

Diyatomit Kullanımının Geopolimer Harçların Özellikleri Üzerine Etkisi

Fikriye AKYÜZ¹

Cenk KARAKURT²

- 1- Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü. fikriyeyuz@anadolu.edu.tr ORCID No: 0009-0005-3222-9744
- 2- Prof. Dr.; Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü. cenk.karakurt@bilecik.edu.tr ORCID No: 0000-0002-4204-5341

ÖZET

Bu çalışmanın amacı, çimento kullanılmadan, atık ve doğal bağlayıcılarla üretilen geopolimer harçlarda, ülkemizde bol miktarda bulunan fakat hafif yapı elemanlarında yeterince değerlendirilmeyen diyatomitin agrega olarak kullanılabilirliğini ortaya koymaktır.

Çalışmada, Afyonkarahisar (AD) bölgesinden temin edilen diyatomit kullanılmıştır. CEN standart kumu, 0-2 mm parçacık boyutu aralığına sahiptir ve kullanılan diyatomit kumla benzer granülometri düzeyine getirilmiştir. CEN standart kumun özgül ağırlığı 2,56'dır. Piknometre deneyi yapılarak, hazırlanan AD agregasının özgül ağırlığı 1,67 olarak ölçülmüştür. Bu değerler, diyatomitin düşük yoğunluğu sayesinde üretilen harçların daha hafif olabileceğini göstermektedir. Yalnızca CEN standart kumun agrega olarak kullanıldığı kontrol serisi üretilmiş, diğer serilerde diyatomitler standart kumun yerine, kuma göre düşük özgül ağırlıklarından dolayı hacimce %10, %20 ve %30 oranlarında ikame edilmiştir. Üretimlerde NaOH ve Na₂SiO₃ çözeltileri ile aktive edilmiş öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu (YFC) bağlayıcı olarak kullanılmıştır. Agregabağlayıcı oranı 2 olarak sabit tutulmuştur. Aktivatör çözeltilerin içeriğindeki suyun dışında su eklenmemiştir. Herhangi bir katkı maddesi kullanılmamıştır. Hazırlanan karışımlar, TS EN 12390-1 standardında tanımlanan koşullara uygun şekilde, iki kademeli bir titreşim işlemiyle 40×40×160 mm boyutlarındaki kalıplara yerleştirilmiştir. Taze haldeki geopolimer harçlar, ilk 24 saat boyunca laboratuvar ortamında, 20 ± 2 °C sıcaklıkta kalıplar içinde bekletilmiştir. 1 gün sonra kalıptan çıkarılan numuneler, deney gününe kadar 20 ± 2 °C sıcaklık ve %50 ± 5 bağıl neme sahip ortam koşullarında küre tabi tutulmuştur.

Belirlenen kür sürelerinin sonunda, mekanik dayanım özellikleri TS EN 1015-11/A1 standardı esas alınarak test edilmiştir. Elde edilen sonuçlar diyatomitin agrega olarak hafif beton üretiminde değerlendirilebileceğini göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Geopolimer harç, Diyatomit, Yüksek fırın cürufu, Hafif beton, Mekanik özellikler

GİRİŞ

Geopolimer Harç

Günümüz inşaat sektörünün karşılaştığı en büyük sorunlardan biri, çevresel sürdürülebilirlik ile yapı malzemelerinin performans beklentilerini dengelemektir. Özellikle Portland çimentosu gibi geleneksel bağlayıcıların üretimi sırasında ortaya çıkan yüksek enerji tüketimi ve yoğun CO₂ salımı, alternatif çözümlere olan ihtiyacı artırmaktadır (Turner ve Collins, 2013:126). Dünyada en fazla üretilen malzeme olan betonun yıllık üretim

miktarı yaklaşık 20 milyar tona ulaşmaktadır. Bu üretimin temel bileşeni olan portland çimentosu, yalnızca 2010 yılına ait verilerde inşaat faaliyetleri kaynaklı 7,7 milyar ton CO₂ emisyonunun %36'sına karşılık gelmektedir. (Montes-Hernandez, 2025:1) Ayrıca bu oran, insan faaliyetlerinden kaynaklanan toplam CO₂ emisyonlarının yaklaşık %8'ini temsil etmektedir. (Miller, John, Pacca ve Horvath, 2018:115). Bu nedenlerle sürdürülebilir bir gelecek için yapı malzemelerinin çevresel etkilerini azaltmaya yönelik çalışmalar, küresel ölçekte büyük önem taşımaktadır. Çalışmalar yapı malzemesi üretiminde çimentoya alternatif bağlayıcılar ve doğal puzolanik katkıların kullanımını teşvik etmektedir. Bu doğrultuda, geopolimer harçlar; düşük karbon ayak izi ve yüksek dayanım gibi avantajlarıyla performans odaklı bir seçenek olarak öne çıkmaktadır.

Geopolimer harçlar, uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve metakaolin gibi silis ve alümina bakımından zengin atık malzemelerin alkali çözeltilerle aktive edilmesi sonucu elde edilir. Bu yapıların, sülfat ve asit gibi agresif ortamlara karşı dayanıklı olması, onları altyapı sistemleri, endüstriyel yapılar ve zorlu çevresel koşullara maruz kalan alanlarda ideal bir malzeme haline getirmektedir (Davidovits, 2013). Ayrıca, yüksek sıcaklığa karşı gösterdikleri direnç sayesinde yangına maruz kalabilecek yapılar için de güvenli bir alternatiftir.

Alkali-aktive bağlayıcılar inşaat malzeme endüstrisinin geleceğinde potansiyel bir temel bileşen olarak değerlendirilmektedir (Provis ve Van Deventer, 2014:40) Çimentoya alternatif bağlayıcılar ile oluşturulan geopolimer harçların en önemli özelliği, üretimlerinde geri dönüştürülebilir ve endüstriyel atıkların kullanılması yoluyla doğal kaynak tüketimini azaltmalarıdır. Bu sayede hem çevresel etkiler sınırlanmakta hem de atık yönetimi desteklenmektedir. Tüm bu yönleriyle geopolimer harçlar, yalnızca teknik performans açısından değil, çevresel sorumluluk bilinciyle şekillenen modern yapı malzemesi anlayışına ve ekonomiye yüksek bir katkı sunmaktadır.

Hafif beton

Hafif beton, geleneksel normal betona kıyasla daha düşük birim hacim ağırlığına sahip olmasına rağmen yeterli mekanik dayanım ve dayanıklılık gösterebilen özel bir beton türüdür. Yoğunluğu genellikle 1800 kg/m³'ün altında olan betonlar hafif beton olarak sınıflandırılmaktadır (ACI 213R, 2014:7). Hafif betonun en belirgin avantajları arasında düşük yoğunluk, ısı ve ses yalıtımında yüksek performans, düşük ısı iletkenlik katsayısı ve yapıların ölü yükünü azaltma özelliği yer almaktadır. Bu özellikleri sayesinde hafif betonlar; yüksek katlı binalar, köprü tabliyeleri, prefabrik yapı elemanları ve yalıtım amaçlı uygulamalarda önemli bir kullanım alanına sahiptir (Neville, 2011:340).

Hafif beton üretiminde iki temel yöntem kullanılmaktadır. İlk olarak, gözenekli hafif agregaların kullanımı yöntemi yaygındır. Pomza, perlit, tuf, genişletilmiş kil ve diyatomit gibi doğal veya yapay kökenli agregalar, yüksek gözeneklilikleri sayesinde betonun yoğunluğunu azaltırken aynı zamanda ısı yalıtım özelliklerini iyileştirmektedir (Karakurt ve Özen, 2017:15). Pomza, perlit, tuf, gibi diyatomit de düşük özgül ağırlığa sahip bir mineral olduğundan hafif beton üretiminde tercihen değerlendirilebilir, örneğin öğütülmüş ve işlenmiş diyatomitlerde hacim yoğunluğu 250–400 kg/m³ değerine kadar düşebilir (Sezgin, 1998:5).

Yapılan bazı çalışmalar neticesinde hafif agregalar ile üretilen hafif betonların kullanılan agreganın cinsine göre çeşitli amaçlarda değerlendirilmesi uygun bulunmuştur. Volkanik tuf ve pomza agregaları kullanılarak üretilen hafif betonlarda, taşıyıcı yapılarda kullanılabilecek düzeyde basınç dayanımı sağlanırken; genişletilmiş kil ve perlit agregalarıyla elde edilen hafif betonların ise daha çok ısı yalıtımı gibi amaçlara yönelik uygulamalar için uygun olduğu değerlendirilmektedir (Karakurt ve Özen, 2017:15).

İkinci yöntem ise hücreli beton üretimidir. Köpük beton veya gaz beton (AAC) gibi türlerde karışıma gaz oluşturuvcu katkıları veya köpük ajanları ilave edilerek gözenekli bir yapı oluşturulur. Bu sayede düşük yoğunluklu, hafif ve yüksek yalıtım özelliklerine sahip betonlar elde edilmektedir. Özellikle gaz beton, otoklav kürüne tabi tutularak boyutsal kararlılık ve yeterli basınç dayanımı kazanmaktadır (Amran vd., 2015:993).

Sonuç olarak, hafif betonlar yalnızca taşıyıcı elemanlarda ağırlık azaltıcı özellikleriyle avantaj sağlamamakta, aynı zamanda enerji verimliliği ve konfor koşullarını iyileştiren yalıtım özellikleriyle de öne çıkmaktadır. Bu nedenle sürdürülebilir yapı malzemeleri arasında önemli bir alternatif olarak değerlendirilmektedir (Neville, 2011:348).

Diyatomit

Diyatomit, Bacillariophyta olarak bilinen tek hücreli ökaryotik alglerin silis içeren kabuklarının fosilleşmesiyle oluşan organik kökenli bir sedimanter kayadır. Hücrelerini, amorf yapıda silis (SiO₂·nH₂O) içeren sert ve früstül adı verilen kabuklarla çevreleyerek korurlar. Diyatomların yaşam süreçleri sona erdiğinde, silisli kabukları çökerek bir araya gelir ve zamanla diyatomit yataklarını meydana getirir. Diyatomeler (Bacillariophyta), fotosentetik özellikleri sayesinde biyolojik, ekolojik ve ekonomik açıdan kritik bir role sahiptir. Alglar arasında önemli bir grup oluşturan bu protistler hem akuatik ortamlarda hem de nemli kara yüzeylerinde yaşam gösterebilirler. (Çetin ve Taş, 2012:29).

Diyatomit; düşük maliyetli, dünya genelinde yaygın olarak bulunan önemli bir doğal mineraldir. Çok yönlü bir malzeme olup, ısı ve ses yalıtımından içecek filtrasyonuna (bira, şarap, havuz suyu), kimyasal

reaksiyon ortamlarından aşındırıcı ve patlayıcı üretimine kadar birçok alanda değerlendirilmektedir (Werner, 1977:24).

Küresel ölçekte tahmini diyatomit rezervi 1 milyar tonun üzerindedir ve başta Amerika Birleşik Devletleri, Çin, Danimarka, Rusya, Arjantin ve Meksika gibi ülkeler olmak üzere birçok ülkede zengin yataklar mevcuttur. Dünya genelinde yıllık diyatomit üretimi yaklaşık 2 ila 2,5 milyon ton arasında değişmektedir. Türkiye ise jeolojik yapısı sayesinde diyatomit açısından oldukça zengin ülkelere biridir. Yapılan araştırmalara göre Türkiye'deki toplam görünür ve potansiyel diyatomit rezervi yaklaşık 200 ile 300 milyon ton olarak tahmin edilmektedir. Manisa, Balıkesir, Isparta, Nevşehir, Afyonkarahisar ve Van gibi illerde yoğunlaşan bu rezervler, yüksek silis içeriği (%70–95) ve fiziksel özellikleri sayesinde sanayide geniş bir kullanım alanı bulmaktadır. Türkiye'de yıllık üretim miktarı ise yaklaşık 60.000 ile 100.000 ton arasında değişmekte olup, bu değer ülkenin dünya üretimi içindeki yerini ortaya koymaktadır. Türkiye, dünya diyatomit rezervlerinin yaklaşık %5'ine sahip olmasına rağmen, bu malzemenin inşaat sektöründe kullanım alanı halen yeterli düzeyde değildir.

Diyatomit, yüksek miktarda amorf silika içeriği, yüksek gözenekliliği ve düşük yoğunluğu ile öne çıkan doğal bir puzolandır. Bu özellikleri sayesinde, hem puzolanik reaksiyonlara girerek bağlayıcı matrisin dayanımına katkıda bulunabilir hem de hafif yapı malzemeleri üretiminde avantaj sağlayabilir (Pavlíková vd., 2022:2). Gözenekli ve hafif yapısı, malzemenin ısı ve ses yalıtım performansını artırırken, düşük yoğunluğu sayesinde yapı elemanlarının ağırlığını azaltır. Bu özellikler, diyatomiti hem hafif hem de enerji verimliliği yüksek yapı malzemelerinin üretiminde cazip kılar.

Diyatomit, yoğunluğu düşürerek harcın toplam ağırlığını azaltmakta, aynı zamanda yalıtım özelliklerini geliştirmektedir. Ancak, gözenekli yapısı mekanik dayanımda belirli bir azalmaya yol açabilir. Bu nedenle, diyatomit katkılı harçlar genellikle hafif geopolimer harçlar, yalıtım panelleri veya yapısal yük taşımayan elemanlarda tercih edilmektedir. Diyatomit agregalı numuneler üzerinde yapılan mekanik dayanım ve birim hacim ağırlık deneyleri ayrıca ısı iletkenlik deneyleri diyatomit agregaların, taşıyıcı olmayan, ısı yalıtımı yüksek, hafif yapı malzemesi üretmek için kullanılabilirliğini göstermiştir. (Uygunoğlu ve Ünal, 2006:69)

Geopolimerler, yüksek dayanım, düşük karbon ayak izi ve çevre dostu üretim süreçleriyle sürdürülebilir inşaat uygulamaları için önemli bir alternatiftir. Diyatomit kullanımı, geopolimer harçların hem izolasyon hem de dayanıklılık özelliklerini iyileştirerek enerji verimliliği yüksek ve çevre dostu yapı projelerine katkı sağlar. Bu bağlamda, diyatomit agrega olarak, özellikle uzun ömürlü, hafif malzemelerin geliştirilmesinde uygun bir seçim olarak öne çıkmaktadır.

Günümüze kadar yapılan akademik çalışmalar incelendiğinde diyatomit amorf silika içeriğinden dolayı bazı çalışmalarda sadece katkı

maddesi olarak kullanılmıştır. Diyatomitin çimento esaslı harçlarda bağlayıcı katkı olarak kullanılabilirliğini araştıran bir çalışma diyatomitin uçucu külden daha yüksek, silis dumanından ise daha düşük aktivite gösterdiğini bildirmiştir (Karahisar Gökkonca, 2010:7). Bazı çalışmalarda ise bağlayıcı olarak çimento yerine ve geopolimer harçlarda uçucu kül yerine ikame edildiği görülmüştür.

Kimi akademik çalışmalarda ise bazı bölge diyatomitlerinin hafif yapı elemanı üretilmesi amacıyla agrega olarak kullanıldığı görülmüştür. Ancak, agrega olarak kullanılan çalışmalarda bağlayıcı olarak çimento tercih edilmiştir. Bu çalışmada diyatomit agrega olarak CEN standart kum yerine ikame edilirken, bağlayıcı olarak öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu kullanılarak, hafif aynı zamanda çevre dostu bir geopolimer harç üretimi hedeflenmiştir.

MATERYAL VE METOT

Bu çalışmada. Ereğli Demir ve Çelik Fabrikası'ndan (Erdemir) temin edilen öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu bağlayıcı olarak kullanılmıştır. Erdemir yüksek fırın cürufunun özgül ağırlığı yaklaşık 2,9 olarak kabul edilmektedir. Tablo 1 yüksek fırın cürufunun içerdiği mineraller hakkında bilgi verilmektedir.

Tablo 1: Granüle Yüksek Fırın Cürufunun Kimyasal Yapısı

Bileşen	%
SiO ₂	38-45
CaO	26-38
Al ₂ O ₃	13-19
MgO	5-10
FeO	1.0 max.
S	1.5 max.
K ₂ O	2.0 max.
MnO	2.5 max.

Kaynak: <https://katalog.oyakmadenmetalurji.com.tr/kalite-detay>

Agrega olarak CEN standart kum kullanılmıştır. CEN standart kumu, 2,56 özgül ağırlığa ve %0,63 su emme oranına sahip olup, 0–2 mm tane boyut aralığında yer almaktadır. Bu kum, minimum %98 SiO₂ içeriğine sahip doğal silika kumundan elde edilen yuvarlak tanelerden oluşmaktadır (Şenol, 2025:7). CEN standart kumun granülometrisi Tablo 2'de sunulmuştur.

Tablo 2: CEN Standart Kumunun Granülometrisi

Elek Göz Açıklığı (mm)	Kümülatif Kalan %
0,08	99 ± 1
0,16	87 ± 5
0,5	67 ± 5
1	33 ± 5
1,6	7 ± 5
2	0

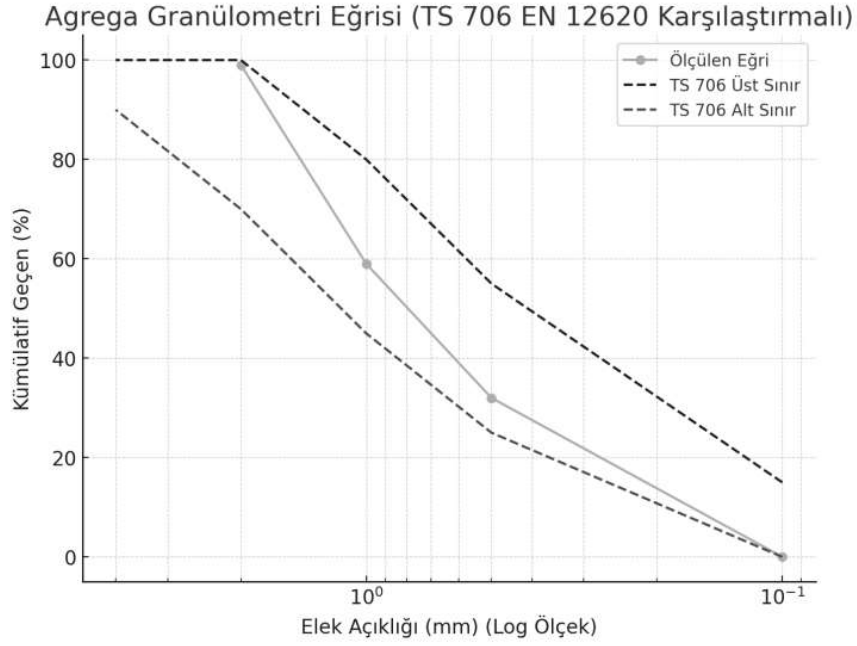
Kaynak: <https://www.hira.com.tr/Tr/Urun/Cen-Standart-Kum>

Kullanılan AD kimyasal bileşimleri X-ışını floresansı (XRF) kullanılarak karakterize edilmiştir. Tablo 3'te sunulan XRF analiz sonuçlarına göre, Afyonkarahisar (AD) örneğinin SiO₂ içeriği %60,73 olarak belirlenmiştir.

Tablo 3: Afyonkarahisar Diyatomit (AD) XRF Analizi

Bileşen	%
SiO ₂	60,73
CaO	4,94
Al ₂ O ₃	11,67
MgO	2,22
Fe ₂ O ₃	2,51
SO ₃	0,07
P ₂ O ₅	1,58
K ₂ O	0,63
Na ₂ O	1,43

İkame agrega olarak Afyonkarahisar (AD) bölgesinden temin edilen diyatomit kullanılmıştır. Yapılan deneyler neticesinde özkütlesi 1,67, su emme kapasitesi 0,99 bulunmuştur. Parçacık boyutu 0,1-2 mm olacak şekilde hazırlanmıştır. Hazırlanan Afyon Diyatomit TS EN 933-1' e göre Elek analizine tabi tutulmuştur. Sonuçlardan oluşturulan grafik Şekil 1' dedir.



Şekil 1: Kullanılan Diyatomitin Granülometri Eğrisi

Çalışmada kullanılan alkali aktivatörler DETSAN Kimya'dan temin edilmiştir. NaOH %98 saflık değerine sahip ve Na₂SiO₃ ise %99 saflık, 1,4 özgül ağırlık ve 3 modül değerlerine sahiptir. Elde edilen bu alkali çözeltiler karışımların hazırlanmasında kullanılmıştır. Na₂SiO₃ çözeltisinin yaklaşık %64'ü su (H₂O) iken, %36'sı katı maddelerden oluşmaktadır.

Geopolimer harç serileri yalnızca CEN standart kumun agregası olarak kullanıldığı kontrol serisi şeklinde ve standart kumun yerine, hazırlanan diyatomit agregası, kuma göre düşük özgül ağırlığından dolayı hacimce %10, %20 ve %30 oranlarında ikame edilerek hazırlanmıştır.

NaOH ve Na₂SiO₃ çözeltileri ile aktive edilmiş öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu (YFC) bağlayıcı olarak kullanılmıştır. Agregası/bağlayıcı oranı 2 olarak sabit tutulmuştur. Harç serilerinde 10 M NaOH çözeltisi kullanılmıştır. Na₂SiO₃/NaOH oranı 2 olarak sabit tutulmuştur. Aktivatör çözeltilerin içeriğindeki suyun dışında su eklenmemiştir. Su/öncül oran 0,37 olarak belirlenmiştir. Herhangi bir katkı maddesi kullanılmamıştır. Geopolimer harç serilerinin isimlendirilmesinde kullanılan 'K' indeksi standart kum ile üretilmiş kontrol harç serisini ifade etmektedir. 'AD' indeksi ise Afyon Diyatomit agregalı harç serilerini ifade eder. AD' yi belirtirken kullanılan sayısal değerler malzemenin toplam kum hacmi içindeki hacimsel yüzdesini temsil eder. Örneğin, AD10 tanımı, toplam kum hacminin %10'una eşdeğer bir miktarın AD ile değiştirildiği bir geopolimer harç karışımını ifade eder.

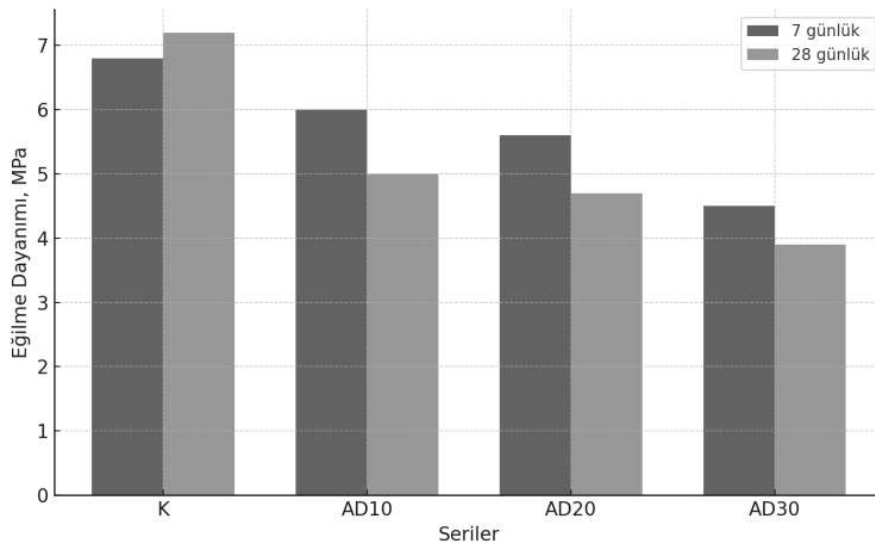
Hazırlanan karışımlar, TS EN 12390-1 standardında tanımlanan koşullara uygun şekilde, iki kademeli bir titreşim işlemiyle 40×40×160 mm boyutlarındaki kalıplara yerleştirilmiştir. Tablo 4' te görüldüğü üzere YFC,

alkali çözelti miktarları ve su/bağlayıcı oranı sabit tutularak kum ve diyatomit miktarları değiştirilerek geopolimer harç serileri oluşturulmuştur.

Tablo 4. Geopolimer Harç Serileri Karışım Tablosu (1 m³)

Numune Adı	NaOH (M)	Na ₂ SiO ₃ (kg)	YFC (kg)	Diyatomit (kg)	Kum (kg)	Su/Bağlayıcı
K	10	150	700	0	1400	0,37
AD10	10	150	700	91	1050	0,37
AD20	10	150	700	183	700	0,37
AD30	10	150	700	274	350	0,37

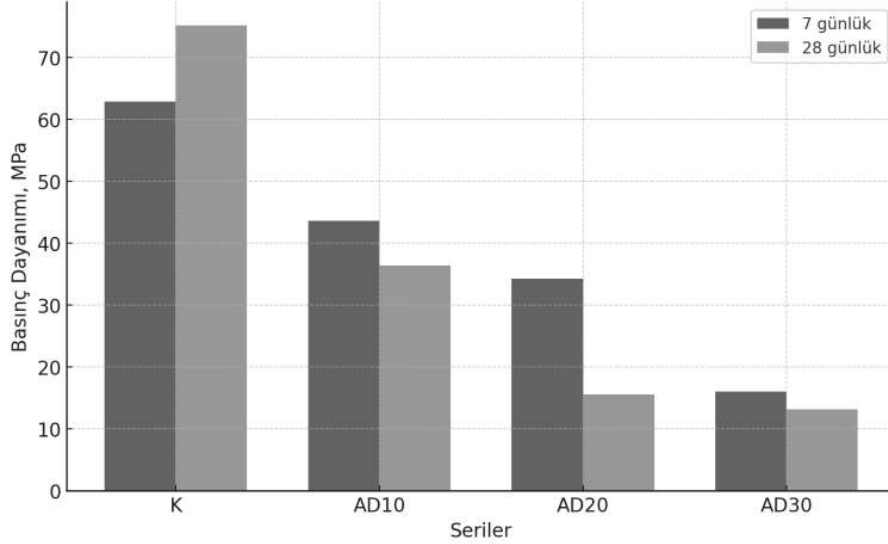
7 günlük ve 28 günlük ortam kürü sonrası harç numuneleri üzerinde üç nokta eğilme ve eksenel basınç dayanımı deneyleri yapılarak geopolimer harçların mekanik özellikleri belirlenmiştir.



Şekil 2: Geopolimer Serilerin 7 ve 28 Günlük Eğilme Dayanımları

Şekil 2' de gösterilen eğilme dayanımı sonuçları incelendiğinde, kontrol serisinin (K) hem 7 günlük hem de 28 günlük eğilme dayanımı açısından en yüksek değerlere ulaştığı, AD ikamesiyle birlikte eğilme dayanımında belirgin bir azalma meydana geldiği görülmektedir. 7 günlük dayanımda K serisi 6,8 MPa değerine ulaşırken, %10, %20 ve %30 oranında AD ikameli seriler sırasıyla 6,0 MPa, 5,6 MPa ve 4,5 MPa değerlerine gerilemiştir. Benzer şekilde, 28 günlük sonuçlarda kontrol serisi 7,2 MPa seviyesine ulaşmış, ancak AD10, AD20 ve AD30 serileri sırasıyla 5,0 MPa, 4,7 MPa ve 3,9 MPa değerleriyle daha düşük performans sergilemiştir. Bu bulgular, ikame oranı arttıkça eğilme dayanımındaki kaybın belirginleştiğini göstermektedir. Dolayısıyla, diyatomit kullanımının malzemeye hafiflik ve

yalıtım özellikleri kazandırabileceği göz önünde bulundurulsa da, mekanik performans üzerinde olumsuz etkiler yarattığı, özellikle yüksek ikame oranlarında bu etkinin daha da arttığı söylenebilir.



Şekil 3: Geopolimer Serilerin 7 ve 28 Günlük Basınç Dayanımları

Şekil 3 eksenel basınç deneyi sonuçlarını göstermekte olup, elde edilen sonuçlar, kontrol serisinin (K) basınç dayanımı bakımından en yüksek performansı gösterdiğini ortaya koymaktadır. K serisinin dayanımı 7 günde 62,9 MPa iken, 28 günde 75,2 MPa seviyesine ulaşarak zamanla beklenen gelişimi sergilemiştir. Bununla birlikte, AD ikameli serilerde dayanım değerleri belirgin şekilde daha düşük çıkmıştır. AD10 serisinde 7 günlük dayanım 43,6 MPa olup 28 günde 36,4 MPa'ya gerilemiştir. AD20 serisi başlangıçta 34,3 MPa değerine sahipken, 28 günlük ölçümde yalnızca 15,6 MPa dayanım göstermiştir. En düşük performans ise AD30 serisinde gözlenmiş; 7 günlük 16 MPa değeri 28 günde 13,2 MPa'ya düşmüştür. Bu bulgular, diyatomit katkısının artmasıyla porozitenin arttığı ve mekanik dayanımda ciddi kayıpların ortaya çıktığını göstermektedir. Özellikle yüksek ikame oranlarında (%20 ve %30) malzemenin uzun dönemli dayanım gelişimi olumsuz yönde etkilenmektedir. Düşük oranlı kullanımın (%10) kısmen uygulanabilir olduğu, ancak daha yüksek oranların basınç dayanımı açısından negatif sonuçlar doğurduğu sonucuna ulaşılabilir.

28 günlük kürlenme süresinden sonra geopolimer serisi için birim hacim ağırlıklar tayin edilmiştir.

Tablo 5: Geopolimer Harç Serileri Birim Hacim Ağırlık Değerleri

Numune Adı	Birim Hacim Ağırlık (g/cm ³)
K	2,23
AD10	2,03
AD20	1,83
AD30	1,70

Tablo 5’te verilen sonuçlar, geopolimer harç serilerinin birim hacim ağırlık değerlerinin diyatomit ikamesiyle birlikte azaldığını açıkça ortaya koymaktadır. Kontrol serisi (K) 2,23 g/cm³ ile en yüksek birim hacim ağırlığa sahipken, %10 diyatomit ikamesi ile bu değer 2,03 g/cm³’e düşmüştür. İkame oranı %20’ye çıkarıldığında 1,83 g/cm³, %30 seviyesinde ise 1,70 g/cm³ değerine kadar gerilemiştir. Bu durum, diyatomitin düşük yoğunluklu ve gözenekli yapısının, harçların birim hacim ağırlığını doğrudan azalttığını göstermektedir.

Sonuçlar, diyatomit ilavesinin geopolimer harçların yoğunluğunu azaltarak hafif yapı malzemelerinin üretimine olanak sağladığını ortaya koymaktadır. Bu durum, özellikle yapıların toplam ölü yükünün azaltılması bakımından önemli bir avantaj sunmaktadır. Bununla birlikte, yoğunluktaki bu azalmanın mekanik dayanım değerlerinde düşüşe neden olduğu da göz önünde bulundurulmalıdır.

SONUÇ

Bu çalışma, diyatomitin agrega olarak standart kum yerine belli oranlarda ikame edilerek, alkali ile aktive edilmiş öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu ile oluşturulan harçların işlenebilirliği, mekanik ve fiziksel özellikler üzerindeki etkilerini araştırmaktadır.

Harç serilerinde mekanik dayanım testleri sonuçlarına göre AD ikame oranı arttıkça eğilme ve basınç dayanım kaybı olduğu görülmektedir. İkame oranı arttıkça diyatomitin su emme kapasitesinin standart kuma göre daha yüksek olması nedeniyle ve boşluklu yapısından dolayı serilerde porozitenin artması dayanım kaybına sebep olabilmektedir. Bu nedenlerle Şekil 2 ve Şekil 3’ te sunulan grafiklere dikkat edildiğinde kontrol numunesinde erken dönem basınç dayanımına göre geç dayanımda bir artış söz konusu iken AD agregalı serilerde geç dönem dayanımlarında erken dönem dayanımlarına göre düşüş olduğu gözlenmektedir. Bu sonuçlar diyatomit agregalı harçlarda yüksek dayanım beklentisinin olmaması gerektiğini göstermektedir.

AD ikamesi arttıkça geopolimer harç serilerinin, birim hacim ağırlıklarının düştüğünü göstermektedir. Tüm bu deney sonuçları bir arada değerlendirildiğinde taşıyıcı amaçlı olmayan hafif yapı elemanı üretiminde diyatomitin geopolimer sistemlerde agrega olarak kullanılabilirliğini ortaya koymaktadır.

REFERANSLAR

- Türk Standardları Enstitüsü. (2021). TS EN 12390-1: Beton - Sertleşmiş Beton Deneyleri - Bölüm 1: Deney numunesi ve kalıplarının şekil, boyut ve diğer özellikleri. Ankara: Türk Standardları Enstitüsü.
- Türk Standardları Enstitüsü. (2000). TS EN 772-4: Kâğır birimler- Deney metotları- Bölüm 4: Tabii taş kâğır birimlerin toplam ve görünen porozitesi ile boşluksuz ve boşluklu birim hacim kütesinin tayini. Ankara: Türk Standardları Enstitüsü.
- Türk Standardları Enstitüsü. (2013). TS EN 1015-11/A1: Kâğır harcı – Deney metotları - Bölüm 11: Sertleşmiş harcın basınç ve eğilme dayanımının tayini. Ankara: Türk Standardları Enstitüsü.
- ACI Komitesi 213. (2014). Yapısal hafif agrega betonu için kılavuz (ACI 213R-14). Amerikan Beton Enstitüsü.
- Amran, Y. H. M., Farzadnia, N., ve Ali, A. A. (2015). Properties and applications of foamed concrete; a review. *Construction and Building Materials*, 101, 990–1005.
- Çetin, M., ve Taş, B. (2012). Biyolojik orijinli tek doğal mineral: Diyatomit. *TÜBAV Bilim Dergisi*, 5(2), 28–46.
- Davidovits, J. (2013). Jeopolimer kimyası ve uygulamaları (4. baskı). Jeopolimer Enstitüsü.
- Karahisar Gökkonca, E. (2010). Diyatomitin yapı malzemeleri endüstrisinde kullanımı üzerine araştırma (Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği ABD).
- Karakurt, C., ve Özen, U. (2017). Influence of natural lightweight aggregates on the properties of concrete. *Journal of the Turkish Chemical Society, Section B: Chemical Engineering*, 1(sp. is. 2), 9–16.
- Miller, S. A., John, V. M., Pacca, S. A., & Horvath, A. (2018). Carbon dioxide reduction potential in the global cement industry by 2050. *Cement and Concrete Research*, 114, 115–124.
- Montes-Hernandez, G. (2025). Decarbonizing the cement industry is crucial for reducing CO₂ emissions: Myth or reality? *Chemical Engineering Journal*, 518, 164995. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.164995> 18.09. adresinden 18 Ağustos 2025 tarihinde alınmıştır.
- Neville, A. M. (2011). Betonun özellikleri (5. baskı). Pearson Education.
- Pavlíková, M., Rovnaníková, P., Záleská, M., ve Pavlík, Z. (2022). Diatomaceous earth—Lightweight pozzolanic admixtures for repair mortars—Complex chemical and physical assessment. *Materials*, 15(19), 6881.
- Provis, J. L., & van Deventer, J. S. J. (Eds.). (2018). Alkali activated materials: *Cement and Concrete Research* 114, 40-48
- Sezgin, M. (1998). Diyatomitin hafif yapı eldesinde değerlendirilebilirliği (Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta).
- Şenol, A. F. (2025). Kullanılmış kahve telvesini geri dönüştürülmüş bir yapı malzemesi olarak kullanan jeopolimer harcın performansı: Deneysel ve öngörücü bir analiz. *Hibrit İlerlemeler*, 10, 100479.

- Turner, L. K., ve Collins, F. G. (2013). Carbon dioxide equivalent (CO₂-e) emissions: A comparison between geopolymer and OPC cement concrete. *Construction and Building Materials*, 43, 125–130.
- Uygunoğlu, T., & Ünal, O. (2006). Diyatomitin hafif blok üretiminde kullanılması. *Politeknik Dergisi/Journal of Polytechnic*, 9(1), 65–70.
- Werner, D. (1977). *The biology of diatoms*. University of California Press.