



AÇIK GÖZENEKLİ HİDROKSİAPATİT KÖPÜK KOMPOZİTLERDE GRAFEN KATKISININ BASMA DAYANIMI ÜZERİNE ETKİSİ

Mustafa KARABATAK¹, Tuğba MUTUK², Mevlüt GÜRBÜZ^{1*}

¹Ondokuz Mayıs University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, 55200, Samsun, Türkiye

²Ondokuz Mayıs University, Faculty of Engineering, Department of Metallurgical and Materials Engineering, 55200, Samsun, Türkiye

Özet: Bu çalışmada, biyomedikal uygulamalarda kullanılmak üzere sünger şablon yöntemiyle açık gözenekli hidroksiapatit (HA) köpük kompozitler üretilmiştir. Sinterleme sonrası yapı ve performans üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla HA matrisine ağırlıkça %0,1, 0,3, 0,5 ve 1 oranlarında grafen (Gr) katkısı yapılmıştır. Numuneler 1300 °C'de 2 saat süreyle sinterlenmiş; deneysel yoğunluk, gözeneklilik, basma dayanımı ve mikroyapısal özellikleri değerlendirilmiştir. Grafen katkısı HA köpüklerin yapısal bütünlüğünü ve mekanik özelliklerini iyileştirmiştir. Özellikle ağ. %0,3 Gr katkılı numune, en yüksek yoğunluk (0,768 g/cm³), en düşük gözeneklilik (%75) ve en yüksek basma dayanımı (~0,152 MPa) değerlerine ulaşmıştır. Bu değer, saf HA köpüğe kıyasla yaklaşık 2,5 katlık bir dayanım artışına karşılık gelmektedir. Ancak ağ.%1 Gr katkısında yoğunluk ve dayanım değerleri düşerken, gözeneklilik artmıştır. Bu durum, grafenin yüksek oranlarda toplanarak mikrogözenek oluşumuna neden olmasıyla ilişkilidir. SEM-EDS görüntüleri incelendiğinde ağ. %0,3 Gr katkısının kompozit yapıda homojen dağılım gösterdiği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Köpük kompozit, Hidroksiapatit, Grafen


Effect of Graphene Addition on Compressive Strength in Open-Pore Hydroxyapatite Foam Composites


Abstract: In this study, open porous hydroxyapatite (HA) foam composites were produced via the sponge template method for use in biomedical applications. Graphene (Gr) was added to the HA matrix at rates of 0.1, 0.3, 0.5, and 1 wt% to investigate its effects on structure and performance after sintering. The samples were sintered at 1300°C for 2 hours, and their bulk density, porosity, compressive strength, and microstructural properties were evaluated. Graphene addition had a significant effect on the structural integrity and mechanical properties of the HA foams. In particular, the sample with 0.3 wt% Gr achieved the highest density (0.768 g/cm³), lowest porosity (75%), and highest compressive strength (~0.152 MPa). This value corresponds to an approximately 2.5-fold increase in strength compared to pure HA foam. However, with a 1 wt% Gr addition, density and strength values decreased, while porosity increased. This is attributed to the high aggregation of graphene, leading to micropore formation. SEM-EDS images revealed a homogeneous distribution of 0.3 wt% Gr within the composite structure.


Keywords: Foam composite, Hydroxyapatite, Graphene

*Sorumlu yazar (Corresponding author): Ondokuz Mayıs University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, 55200, Samsun, Türkiye

E mail: mgurbuz@omu.edu.tr (M. GÜRBÜZ)

Mustafa KARABATAK  <https://orcid.org/0000-0001-8471-7428>

Tuğba MUTUK  <https://orcid.org/0000-0003-0143-2721>

Mevlüt GÜRBÜZ  <https://orcid.org/0000-0003-2365-5918>

Cite as: Karabatak M, Mutuk T, Gürbüz M. 2025. Effect of graphene addition on compressive strength in open-pore hydroxyapatite foam composites. BSJ Eng Sci, 8(6): 1774-1779.

Gönderi: 29 Temmuz 2025

Kabul: 20 Eylül 2025

Yayınlama: 15 Kasım 2025

Received: July 29, 2025

Accepted: September 20, 2025

Published: November 15, 2025

1. Giriş

Biyomalzeme araştırmaları kapsamında, kalsiyum-fosfat esaslı hidroksiapatit [$Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$], kimyasal bileşimi ve kristal yapısının insan kemik dokusunun inorganik fazına yüksek oranda benzerlik göstermesi nedeniyle büyük öneme sahiptir. Bu benzerlikten ötürü, hidroksiapatit biyoseramikler çeşitli biyomedikal uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle ortopedik implantlar, protez yüzey kaplamaları, dental dolgu materyalleri, kraniyofasiyal rekonstrüksiyon, spinal cerrahi ve kemik fiksasyon sistemleri gibi pek çok alanda klinik kullanım alanı bulmuştur. Hidroksiapatit içerisinde bulunan apatit fazı, insan kemiği ve dişlerinin mineral bileşimiyle yüksek yapısal uyum göstermektedir. Bu materyalin üstün biyouyumluluğu, düşük in vivo çözünme hızı, osteokondüktif özelliği ve fizyolojik koşullardaki

kimyasal-biyolojik stabilitesi, onu yüksek gözenekli biyoseramik yapıların üretimi açısından son derece uygun kılmaktadır. Dolayısıyla, hidroksiapatit günümüzde kemik doku mühendisliği ve rejeneratif tıp uygulamaları için tercih edilen başlıca seramik esaslı biyomalzemelerden biri olarak öne çıkmaktadır. (Kalita vd., 2007; Shi vd., 2017; Ressler vd., 2021). Hidroksiapatit biyoseramiklerin sınırlı mekanik dayanımı, özellikle yük taşıyan implant uygulamalarında kullanımını kısıtlamakta olup, bu durumu aşmak amacıyla yüksek gözenekli biyoseramik yapıların geliştirilmesine yönelik araştırmalar son yıllarda artan bir önem kazanmıştır. Kalsiyum-fosfat esaslı hidroksiapatit, altıgen rombohedral kristal sisteminde kristallenmekte olup, birim hücre parametreleri $a = b = 9,432 \text{ \AA}$ ve $c = 6,881 \text{ \AA}$ şeklindedir. Bu yapı, biyolojik apatite benzerliği açısından büyük avantaj sağlamaktadır.



Teorik olarak en uygun kalsiyum/fosfor (Ca/P) oranı 1,67 (yani 10/6) olup, bu oran hidroksiapatitin kimyasal stabilitesi ve biyolojik uygunluğu açısından kritik bir parametredir. Hidroksiapatitin hesaplanan teorik yoğunluğu ise yaklaşık $3,219 \text{ g/cm}^3$ 'tür. Bu kristalografik ve fiziksel özellikler, hidroksiapatitin doku mühendisliği ve biyomedikal implant tasarımındaki işlevselliğini doğrudan etkilemektedir (Evis, 2011; Dadaev, 2019). Kemik yapısı, trabeküler bölgede %75 oranında gözenekli bir ağ yapısına sahiptir. İnsan kemiklerinin kortikal kısmındaki gözenek boyutları 10 nm ile 50 μm arasında değişirken, trabeküler bölgedeki gözenek boyutları 50 μm ile 500 μm arasında değişir. (Sopyan vd., 2007; Swain vd., 2011; Stipnice vd., 2016; Iwamoto vd., 2021). Yüksek gözeneklilik gösteren biyoseramikler, yeni kemik oluşumu ve biyoyumluluk için daha iyi destek sağlamaktadır. Kemik dokusu mineralizasyonu için gözenek çapının en az 100 μm olması gerekmektedir. Kemik dokusu mühendisliğinde, biyoseramik gözenek boyutu en az 300 μm çapında olursa daha iyi biyoyumluluk göstermektedir. Makro boyutlu gözenekli biyoseramikler, yoğun biyoseramiklerden daha iyi biyoyumluluk sergilemekte yük ve dış kuvvetlere maruz kalmayan kemik kusurlarını doldurmak için kullanılan gözenekli biyosentetik kemik dolgu malzemelerinin gelişimini arttırmaktadır (Çakmak, 2015; Dadaev and Gürbüz, 2019).

Gözenekli hidroksiapatit üretmek için çeşitli yöntemler bulunmaktadır. Bu yöntemler arasında, hidroksiapatit (HA) tozuna organik parçacıkların katılması, polimerik sünger şablon yöntemi, köpüklerin jel dökümü, nişasta konsolidasyonu, mikrodalga işlem, kaydırma dökümü ve elektroforetik biriktirme tekniği bulunmaktadır. Bu yöntemler, hidroksiapatit matrisinin farklı özelliklerini ve yapısını sağlamak için çeşitli yaklaşımlar sunmaktadır. En yaygın kullanılan yöntemlerden biri sünger şablon yöntemidir. Bu yöntem, kontrol edilebilir gözenek boyutu ve karmaşık şekilli yapıların üretimine imkan tanımaktadır. Sünger şablon yöntemi, gözenekli polimer sünger malzemenin HA çamur malzemeye emdirilmesi işlemiyle gerçekleştirilmektedir. Sünger şablon yöntemiyle hazırlanan gözenekli HA'nın kontrol edilebilir gözenek boyutu ve bağlantılı gözeneklere sahip olduğu, ancak yük taşıyan uygulamalar için zayıf mekanik dayanıklılığa sahip olduğunu göstermiştir. Literatürde, sünger şablon yönteminin, osseointegrasyon için gereken uygun gözenek boyutu dağılımını sağladığı ve uygun derecede bağlantılı mikro ve makro gözeneklerin varlığıyla karakterize olduğu belirtilmektedir (Sopyan vd., 2007; Swain vd., 2011; Jokic vd., 2012; Gürbüz vd., 2014). Grafen (Gr), sp^2 hibritleşmiş karbon atomlarının oluşturduğu iki boyutlu bal peteği benzeri bir kafes yapısına sahip karbon türevli bir malzemedir ve grafit, fullerenler ile karbon nanotüpler gibi diğer karbon allotroplarının temel yapı taşıdır. Tek atom kalınlığındaki düzlemsel yapısı sayesinde, hem üst hem de alt yüzeylerinden ana malzeme ile geniş bir temas yüzeyi oluşturur; bu da grafene, karbon nanotüpler ve

fullerenlerle karşılaştırıldığında önemli bir avantaj sağlar. Grafen, kesintisiz sp^2 hibritleşmiş karbon atomları ağı sayesinde olağanüstü mekanik, optik ve elektronik özellikler sergilemektedir. Nitekim, teorik ve deneysel çalışmalar, grafenin Young modülünün 1 TPa'ya, içsel mukavemetinin ise yaklaşık 130 GPa'a kadar ulaşabildiğini ortaya koymuştur. Bu üstün özellikler, grafenin fiziksel ve kimyasal etkileşimlerde aktif yüzey alanını artırarak matris malzeme ile güçlü bir ara yüz oluşturmaya olanak tanır. Ayrıca, karbon elementinin doğada bol miktarda bulunması ve toksik etkilerinin olmaması, karbon türevli malzemeleri çevresel açıdan sürdürülebilir ve biyoyumlu seçenekler haline getirmektedir. Doğal kaynaklı grafit güvenle kullanılabilir ve grafitten türetilen grafenin de biyomedikal ve biyoteknolojik uygulamalarda güvenli, etkili ve uygun bir alternatif sunabileceği değerlendirilmektedir (Raju, 2017; Singh, 2019; Kumar vd., 2020).

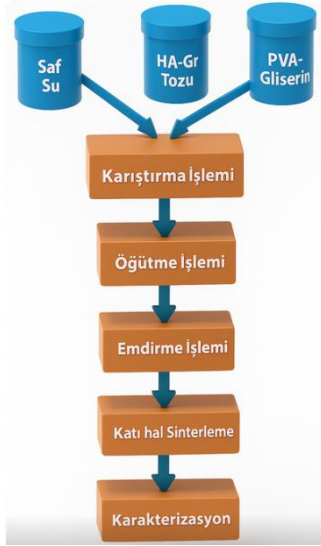
Biyoseramikler iyi bir fiksasyon ve bağlanma yeteneğine sahip olsa da, artan gözeneklilik oranıyla birlikte mekanik mukavemetlerinde belirgin bir azalma gözlenmektedir. Bu çalışmada, HA yapısına ağırlıkça %0,1, 0,3, 0,5 ve 1 oranlarında grafen (Gr) takviyesi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen numuneler, 1300 °C sıcaklıkta 2 saat süreyle sinterlenmiş ve grafen takviye fazının HA köpük malzemenin fiziksel özellikleri, basma dayanımı ve mikroyapısal özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir.

2. Materyal ve Yöntem

Çalışmada kullanılan gümüş katkılı hidroksiapatit tozu <100nm boyutundadır (Nanotech İleri Teknolojik Malzemeler, Eskişehir, saflığı %99). Gr tabaka kalınlığı ise 5-8 nm boyutundadır (Grafen Chemical Industries Co., saflığı %99,5). Çamur emdirme işlemi için hazırlanacak olan çamur malzeme için kullanılan katkı maddeleri Tablo 1'de verilmiştir. HA'ya, Gr ağı. %0,1, 0,3, 0,5 ve 1 oranlarında katılmıştır. Gr katkı oranı ağı. %0,1 olan numune HA-Gr0.1 olarak adlandırılmıştır. Diğer oranlar da benzer şekilde kodlanmıştır. Sünger şablon yöntemi kullanılarak üretilen takviyesiz HA köpük ve malzeme üretim şeması Şekil 1'de görülmektedir.

Tablo 1. Sünger şablon yöntemi için hazırlanan çamurun içeriği ve katkı miktarları

Katkı maddeleri	HA	Saf Su	Polivinil Alkol (PVA)	Gliserin
Yüzdellik (%)	30	60	5	5



Şekil 1. Sünger şablon yöntemi ile gözenekli köpük malzeme üretim şeması.

Bu çalışmada, emdirme işlemi için kullanılacak olan gözenekli sünger malzeme ilk olarak $1,5 \times 1,5 \times 1,7$ cm boyutlarında küp formunda hazırlanmıştır. Çamur malzeme hazırlanırken, öncelikli olarak Tablo 1’de verilen oranlar ile çamur karışımı hazırlanmıştır. Bu karışım manyetik karıştırıcıda $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta, 30 dakika süreyle karıştırılarak PVA’nın tamamen çözünmesi sağlanmıştır. PVA’nın çözünmesinin ardından, hazırlanan çözelti toz malzemelerle birlikte karıştırma kabına aktarılmış ve karışıma %5 oranında gliserin eklenmiştir. Tüm bileşenlerin karıştırma kabında birleştirilmesinin ardından, homojen bir karışım elde edilebilmesi amacıyla karışım 20 saat boyunca bilyalı değirmende öğütülmüştür. Öğütme işlemi tamamlandıktan sonra, hazırlanan karışım gözenekli sünger numunelere emdirilmiş ve bu numuneler oda sıcaklığında 72 saat boyunca kurutmaya bırakılmıştır. Kurutma işleminin ardından elde edilen HA bazlı köpük malzemeler, $1300\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta, $5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{dk}$ ısınma hızıyla, 2 saat boyunca katı hal sinterlemeyle hava ortamında işlemine tabi tutulmuştur. Sinterleme koşulları önceki çalışmalarımızdan yararlanılarak belirlenmiştir (Dadaev, 2019). Aynı üretim işlemi, Gr takviyeli HA köpük kompozit malzeme üretimi için de uygulanmıştır. Hazırlanan malzemelerin sinterleme öncesi ve sonrası yoğunlukları ve gözeneklilikleri (%) hesaplanmıştır. Yoğunluk ölçümleri örneklerin boyutları ve ağırlığı ölçülerek aşağıdaki eşitliğe göre hesaplanmıştır. Yoğunluk d (g/cm^3), m malzemenin kütlesi (g), v malzemenin ölçülen hacim (cm^3) değeridir. Bulunan değer HA teorik yoğunluk değerine bölünerek %yoğunluk olarak hesaplanmıştır.

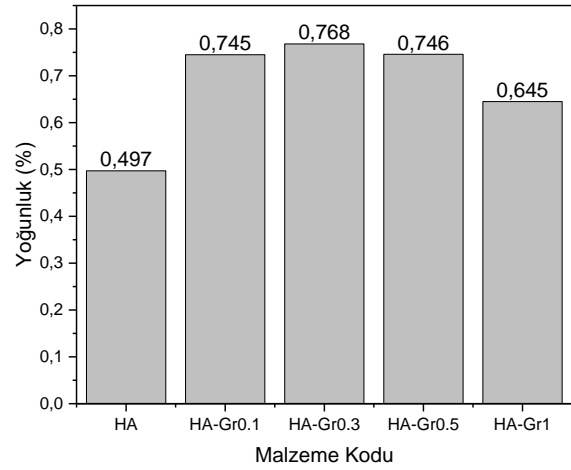
$$d = \frac{m}{v} \quad (1)$$

Çalışmada, üretilen numunelere uygulanan basma dayanım testi çalışmaları ASTM C1424-15 standardına göre ve literatür çalışmalarından yararlanılarak gerçekleştirilmiştir (Jokic vd., 2012; Bertolla vd., 2014;

Novotna vd., 2022; Avcı, 2023). Şekillendirilmiş seramik malzemeler için basma testi esnasında belirtilen çapraz kafa hızı $0,5\text{ mm}/\text{dk}$ ’dır ve basma dayanımının belirlenmesi için Instron Universal marka test cihazı kullanılmıştır. Hazırlanan köpük kompozit malzemelerin mikro yapıları analizleri taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak yapılmıştır.

3. Bulgular ve Tartışma

Gr takviyesinin HA köpük malzemenin yoğunluğa etkisi Şekil 2’de verilmektedir. Ağ. %0,5 Gr takviyesine kadar yoğunlukta artış meydana gelerek, en düşük yoğunluk HA-Gr0.1 köpük kompozit malzemede $\sim 0,745\text{ g}/\text{cm}^3$ iken en yüksek yoğunluk HA-Gr0.3 köpük kompozit malzemede $\sim 0,768\text{ g}/\text{cm}^3$ yoğunluk değeri elde edilmiştir. Takviyesiz HA köpük malzeme ile karşılaştırıldığında yaklaşık olarak %55 oranında artış meydana gelmiştir.

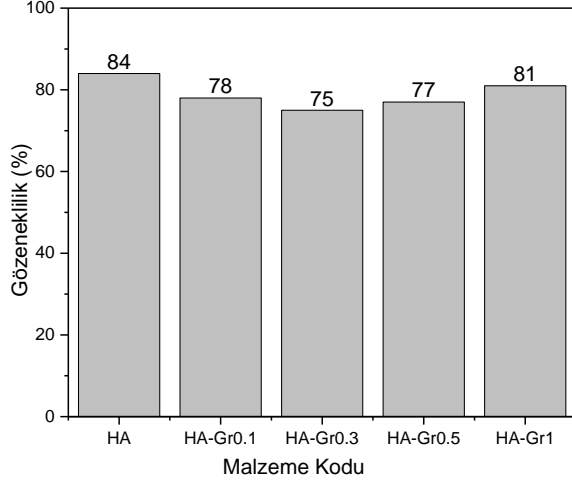


Şekil 2. Gr takviyesinin HA köpüğün yoğunluğa etkisi.

Şekil 3’te sinterleme işlemi sonrasında yapılan yoğunluk ölçümü sonucunda Gr takviye oranına bağlı olarak gözeneklilik oranındaki değişimi (%) görülmektedir. HA-Gr0.5 katkılı numuneye kadar gözeneklilik oranında azalma meydana gelerek HA-Gr0.1 köpük kompozit malzemede $\sim 78\%$ iken en düşük gözeneklilik oranı HA-Gr0.3 köpük kompozit malzemede $\sim 75\%$ gözeneklilik meydana gelmiştir. Takviyesiz HA köpük malzeme ile karşılaştırıldığında yaklaşık olarak %11 azalma meydana gelmiştir. Grafen katkısı hücre duvarında tane sınırında yer alarak yapıyı daha güçlü hale getirmiştir. Ancak yüksek grafen oranlarında topaklanmadan ötürü gözenek yapısının yeniden arttığı görülmüştür. Düşük oranlardaki grafen katkısı (ağ. %0,1–0,5 arası), HA matrisine düzgün şekilde dağılmakta ve sinterleme sırasında daha yoğun bir hale gelmesini sağlamaktadır. Grafen nanoboyutta olduğundan miktarı arttıkça topaklanma eğilimi artmaktadır. Bu nedenle daha az oranlarda grafen katkısı daha etkili olmaktadır. Bu durum, porozitenin azalması ve buna bağlı olarak yoğunluğun artması ile sonuçlanmaktadır. Bu, grafenin sinterleme sırasında partiküller arası bağlanmayı teşvik ederek yoğunluğu

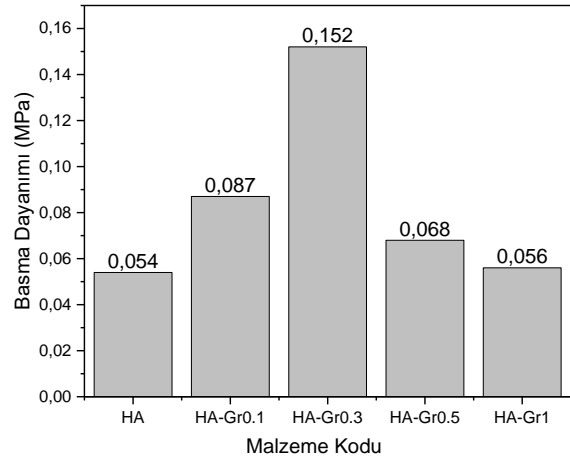
artırıcı rol oynadığını göstermektedir (Dadaev, 2019; Dadaev and Gürbüz, 2019).

Ancak grafen oranı arttığında HA-Gr1 kompozit malzemede, gözeneklilikte yeniden artış ve yoğunlukta düşüş gözlenmiştir. Bu durum, grafenin yüksek oranlarda aglomerasyon eğilimi göstermesi ile açıklanabilir. Aşırı grafen, HA partikülleri arasında düzgün dağılmak yerine kümelenerek HA'nın sinterleme etkinliğini azaltmakta, bu da gözeneklerin kapanmasını engelleyerek daha az yoğun bir yapı oluşmasına neden olmaktadır.



Şekil 3. Gr takviyesinin HA köpüğün gözenekliliğe (%) etkisi.

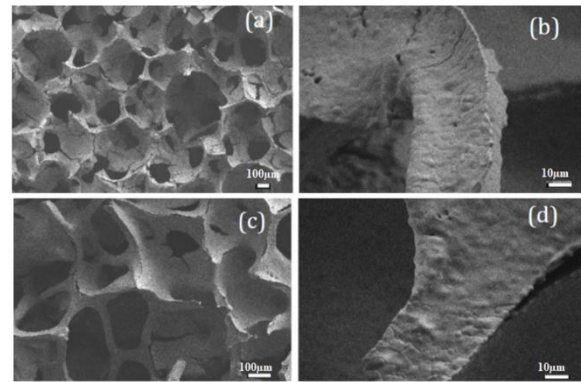
Şekil 4'te HA-Gr köpük kompozit malzemenin maksimum basma dayanım test sonuçları verilmiştir. HA-Gr0.5 takviyesine kadar basma dayanımında artış meydana gelmiştir. En düşük basma dayanımı HA-Gr0.1 takviyeli köpük kompozit malzemede 0.087 MPa iken en yüksek basma dayanımı HA-Gr0.3 takviyeli köpük kompozit malzemede 0.152 MPa basma dayanımı meydana gelmiştir. Takviyesiz HA köpük malzemeye göre yaklaşık olarak 2,5 kat bir artış meydana gelmiştir. HA-Gr0.3 takviyeli köpük kompozit malzemede elde edilen maksimum basma dayanımı süngerimsi kemiğin minimum sınır (0,1-16 MPa) değerleri arasında ve uygun olduğu görülmektedir (Gerhardt and Boccaccini, 2010). Maksimum basma dayanımı sonuçlarına göre, sinterleme sırasında grafenin oldukça ince tabakalı yapısından ötürü tane sınırlarında bariyer oluşturması, yük tranferi ile yükü taşıması ve çatlak ilerlemesini durdurucu etkisi maksimum basma dayanımı artışını açıklayabilir. (Zhao vd., 2013; Li vd., 2018). HA-Gr0.3 takviyeli kompozit numuneden sonraki maksimum basma dayanım sonuçlarında azalma meydana gelmiştir. Bu durum nano yapıdaki Gr'nin matris içinde miktarı arttıkça topaklanma eğiliminin sinterleme esnasında mikro gözeneklerin oluşması ile açıklanabilir. Bu durum, hem yoğunluğu hem de basma dayanımını olumsuz yönde etkilemektedir (Baradaran vd., 2015).



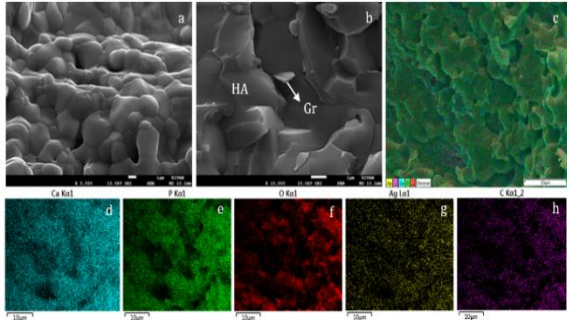
Şekil 4. Gr takviyesinin HA köpük kompozitin maksimum basma dayanımına etkisi.

Şekil 5'te HA ve HA-Gr0.3 köpük malzemenin farklı büyütmelelerdeki SEM görüntüleri verilmiştir. Her iki malzeme içinde genel görüntüye bakıldığında gözenek boyutunun şekilde görüldüğü üzere 200-500 mikron arasında değiştiği görülmektedir (Şekil 5(a, c)). Hücre duvarlarının kalınlığı ise yaklaşık olarak 400 mikron civarı olduğu görülmüştür (Şekil 5(b, d)).

Şekil 6'da HA-Gr0.3 köpük kompozitinin yoğun hücre duvarının kırık yüzeyinden alınan SEM-EDS görüntüleri yer almaktadır. Şekil 6a-b'de verilen SEM analizinden düşük büyütmede tane boyutu yaklaşık 1-3 mikrometre arası değiştiği, daha yüksek büyütmede ise grafen taneler arasında ve içyapıda bulunduğu görülmektedir. Şekil 6(c-h)'da ise bu malzemeye ait kırık yüzeyden yapılan elemental haritalama analizi verilmiştir. Renklendirilmiş harita görüntülerine göre Ca, P, O ve Ag elementleri HA'dan C elementi ise Gr'den gelmektedir. Yapıda C homojen dağılımı mikroyapı görüntüleri ile desteklenmektedir.



Şekil 5. HA ve HA-Gr0.3 köpük malzemesine ilişkin genel (a, c) ve hücre duvarı SEM görüntüleri (b, d).



Şekil 6. HA-Gr0.3 köpük kompozit malzemenin SEM- EDS analizi.

4. Sonuç ve Öneriler

Bu çalışmada, sünger şablon yöntemiyle yüksek gözenekli HA köpük kompozitler farklı oranlarda (ağ. %0,1, 0,3, 0,5 ve 1) grafen takviyesi ile 1300 °C' de 2 saat süreyle sinterlenerek üretilmiştir. Kompozitlerin, fiziksel ve mekanik özelliklerindeki değişim araştırılmıştır.

Yoğunluk ve gözeneklilik sonuçları, takviyesiz HA'da yoğunluk 0,497 g/cm³ iken HA-Gr0.3 takviyesinde 0,768 g/cm³ değeri elde edilmiş olup; yaklaşık olarak %55 oranında bir artış meydana gelmiştir.

HA-Gr0.3 takviyesi ile %75 oranında gözeneklilik elde edilerek takviyesiz HA'ya göre yaklaşık olarak %11'lik bir azalma meydana gelmiştir. Düşük oranlardaki grafen katkısının (özellikle HA-Gr0.3) HA matrisinde daha homojen dağılım sağladığını ve sinterleme sırasında yoğun yapılar oluşmasına katkıda bulunduğunu göstermiştir. Bu sayede yoğunluk artarken gözeneklilik azalmıştır. HA-Gr1 grafen katkısında, yoğunlukta düşüş ve gözeneklilikte yeniden artış gözlenmiş, bu durum yüksek grafen içeriğinin matris içinde aglomerasyon eğiliminde olduğunu ve mikroyapısal bütünlüğü olumsuz etkilediğini ortaya koymuştur.

Mekanik dayanım açısından, HA-Gr0.3 HA köpük kompozit numunesi en yüksek basma dayanımına (~0,152 MPa) ulaşmıştır. Bu değer, süngerimsi kemiğin minimum dayanım değerlerine uygundur ve bu katkı oranının mekanik performansı optimize ettiği anlaşılmaktadır.

SEM analizleri, Gr katkısı ile birlikte yoğun hücre duvarında taneler arasında grafenin bulunduğunu göstermiştir. Ayrıca, EDS analizleriyle grafen kaynaklı karbon elementinin yapıda homojen dağıldığı doğrulanmıştır.

Bu çalışma, grafen katkılı HA köpük kompozitlerin yapısal ve mekanik performansını optimize etmek için katkı oranının dikkatli şekilde kontrol edilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Özellikle ağ.%0,3 grafen oranının ideal performans dengesi sunduğu belirlenmiştir.

Katkı Oranı Beyanı

Yazarların katkı yüzdeleri aşağıda verilmiştir. Yazarlar makaleyi incelemiş ve onaylamıştır.

	M.K.	T.M.	M.G.
K	40	20	40
T	40	20	40
Y	30	20	50
VTI	40	30	30
VAY	40	30	30
KT	40	30	30
YZ	30	40	30
KI	30	30	40
GR	30	30	40
PY	30	30	40
FA	30	30	40

K= kavram, T= tasarım, Y= yönetim, VTI= veri toplama ve/veya işleme, VAY= veri analizi ve/veya yorumlama, KT= kaynak tarama, YZ= yazım, KI= kritik inceleme, GR= gönderim ve revizyon, PY= proje yönetimi, FA= fon alımı.

Çatışma Beyanı

Yazarlar bu çalışmada hiçbir çıkar ilişkisi olmadığını beyan etmektedirler.

Etik Onay Beyanı

Bu çalışmada hayvanlar ve insanlar üzerinde herhangi bir çalışma yapılmadığı için etik kurul onayı alınmamıştır.

Kaynaklar

- Avcı Ş. 2023. Preparation and characterization of porous hydroxyapatite reinforced with hydroxyapatite whiskers, JANSET, 3 (1): 1-6.
- Baradaran S, Moghaddam E, Bahman NT, Basirun WJ, Mehrli M, Sookhikian M. 2015. Characterization of nickel-doped biphasic calcium phosphate/graphene nanoplatelet composites for biomedical application. Mater Sci Eng C Mater Biol Appl, 49: 656-668.
- Bertolla L, Dlouhý I, Boccaccini AR. 2014. Preparation and characterization of Bioglass®-based scaffolds reinforced by poly-vinyl alcohol/microfibrillated cellulose composite coating. J Eur Ceram, 34(14): 3379-3387.
- Çakmak S. 2015. Development of hydroxyapatite/peptide amphiphile based nanocomposite scaffolds for bone tissue repair. PhD thesis, Hacettepe University, Institute of Science, Ankara, Türkiye, pp:183.
- Dadaev R. 2019. Grafen reinforced calcium phosphate based ceramic foam materials artificial bone purpose production and characterization. MSc thesis, Ondokuz Mayıs University, Institute of Science, Samsun, Türkiye, pp:70.
- Dadaev R, Gürbüz M. 2019. Optimization of process parameters for porous artificial bone. IJMSIT, 3: 28-30.
- Evis Z. 2011. Çeşitli iyonlar eklenmiş nano-hidroksiapatitler: üretim yöntemleri, iç yapı, mekanik ve biyouyumluluk özellikleri yönlerinden incelenmesi. IJERAD, 3 (1):55-65.
- Gerhardt LC, Boccaccini AR. 2010. Bioactive glass and glass-ceramic scaffolds for bone tissue engineering. Mater, 3 (7): 3867-3910.

- Gürbüz M, Şenel M, Akyürekli A, Koç E, Doğan A. 2014. Endüstriyel alümina köpük üretimi ve teknolojik karakterizasyonu. 10th International Fracture Conference, April 24-26, Kayseri, Türkiye, p: 333-339
- Iwamoto T, Hieda Y, Kogai Y. 2021. Effects of molecular weight on macropore sizes and characterization of porous hydroxyapatite ceramics fabricated using polyethylene glycol: mechanisms to generate macropores and tune their sizes. In: *Mater Today Chem*, 20:100421.
- Jokic B, Ivan S, Milorad Z, Kosovka OD, Petrovic R, Djordje J. 2012. Silicon-doped biphasic α -calcium-phosphate/hydroxyapatite scaffolds obtained by a replica foam method using uniform pre-annealed spherical particles. *Mater Lett*, 74: 155–158.
- Kalita SJ, Bhardwaj A, Bhatt HA. 2007. Nanocrystalline calcium phosphate ceramics in biomedical engineering. *Mater Sci Eng C*, 27 (3): 441–449.
- Kumar S, Gautam C, Chauhan BS, Srikrishna S, Yadav R, Rai SB. 2020. Enhanced mechanical properties and hydrophilic behavior of magnesium oxide added hydroxyapatite nanocomposite: A bone substitute material for load bearing applications. *Ceram Inter*, 46 (10): 16235–16248.
- Li M, Xiong P, Yan F, Li S, Ren C, Yin Z vd. 2018. An overview of graphene-based hydroxyapatite composites for orthopedic applications. *Bioact Mater*, 3 (1): 1–18.
- Novotna L, Chlup Z, Jaros J, Castkova K, Drdlik D, Pospisil, J vd. 2022. Macroporous bioceramic scaffolds based on tricalcium phosphates reinforced with silica: microstructural, mechanical, and biological evaluation. *J Asian Ceram Soc*, 10 (2): 356–369.
- Raju APR. 2017. Production and applications of graphene and its composites. PhD Thesis, The University of Manchester, UK, pp:273
- Ressler A, Žužić A, Ivanišević I, Kamboj N, Ivanković H. 2021. Ionic substituted hydroxyapatite for bone regeneration applications: A review. *Open Ceram*, 6: 100122.
- Shi X, Zhou J, Liu G, Wang L. 2017. The physical and antimicrobial properties of silver doped hydroxyapatite sintered by microwave and conventional sintering. *J Inorg Organomet Polym*, 27: 955–961.
- Singh RP. 2019. Utility of nanomaterials in food safety. In: Singh RL, Mondal S, editors, *Food Safety and Human Health*, Elsevier, pp: 285–318.
- Sopyan I, Mel M, Ramesh S, Khalid KA. 2007. Porous hydroxyapatite for artificial bone applications. *Sci Technol Ad Mater*, 8 (1-2): 116–123.
- Stipnice L, Narkevica I, Sokolova M, Locs J, Ozolins J. 2016. Novel scaffolds based on hydroxyapatite/poly (vinyl alcohol) nanocomposite coated porous TiO₂ ceramics for bone tissue engineering. *Ceram Int* 42 (1): 1530–1537.
- Swain SK, Bhattacharyya S, Sarkar D. 2011. Preparation of porous scaffold from hydroxyapatite powders. *Mater Sci and Eng C*, 31 (6): 1240–1244.
- Zhao Y, Sun KN, Wang WL, Wang YX, Sun XL, Liang YJ vd. 2013. Microstructure and anisotropic mechanical properties of graphene nanoplatelet toughened biphasic calcium phosphate composite. *Ceram Int*, 39 (7): 7627–7634.