



## Araştırma Makalesi / Research Article

**Karbon fiber kaplamalı TPMS kafes yapılarının basma testi analizi**  
*Compression test analysis of carbon fiber coated TPMS lattice structures*Özgün Ceren Akbay<sup>1</sup>, Burak Özdemir<sup>2</sup>, Erkan Bahçe<sup>1</sup>, Mehmet Akif Oymak<sup>1</sup><sup>1</sup> İnönü Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, ceren.akbay@gmail.com  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7839-2484><sup>1</sup> İnönü Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, erkan.bahce@inonu.edu.tr  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5389-5571><sup>1</sup> İnönü Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, akif.oymak@gmail.com  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8251-3106><sup>2</sup> Malatya Turgut Özal Üniversitesi, Hekimhan Mehmet Emin Sungur Meslek Yüksek Okulu, burak.ozdemir@ozal.edu.tr  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5870-0398>

## MAKALE BİLGİLERİ

## Makale Geçmişi:

Geliş 9 Ocak 2025  
Revizyon 25 Şubat 2025  
Kabul 3 Mart 2025  
Online 26 Mart 2025

## Anahtar Kelimeler:

TPMS, Karbon Fiber  
Kaplama, Eklemeli İmalat,  
Mekanik Performans

## ÖZ

Eklemeli imalat, karmaşık geometrilere sahip hafif ve yüksek performanslı yapılar üretme imkânı sunan yenilikçi bir üretim teknolojisidir. Bu teknolojinin öne çıkan uygulamalarından biri olan Triply Periodic Minimal Surface (TPMS) yapılar, düşük yoğunluk, yüksek yüzey alanı, enerji emilimi ve mekanik dayanım gibi avantajlar sağlamaktadır. Ancak eklemeli imalatla üretilen TPMS yapılarının mekanik dayanımı uygulama gereksinimlerini karşılamakta yetersiz kalabilmektedir. Bu bağlamda karbon fiber kaplama TPMS yapılarının mekanik dayanımını ve sertliğini artırarak yük taşıma kapasitesini iyileştiren etkili bir çözüm olarak öne çıkmaktadır. Bu çalışma karbon fiber kaplamalı TPMS kafes yapılarının mekanik performansını incelemiş ve farklı geometrik tasarımların enerji emme kapasitesi, yük taşıma dayanımı ve elastik modül üzerindeki etkilerini değerlendirmiştir. Octet geometrisi 1250 J enerji emme kapasitesi ve 500 N maksimum yük taşıma dayanımı ile en yüksek performansı sergilerken, elastik modül açısından diğer geometrilere kıyasla daha düşük bir değer göstermiştir. HMK (1100 J, 450 N), YMK (950 J, 400 N) ve Elmas (850 J, 350 N) geometrileri ise dengeli performanslarıyla farklı uygulama alanları için uygun seçenekler sunmaktadır. Elde edilen bulgular karbon fiber kaplamanın TPMS yapılarının mekanik özelliklerini optimize etmede etkili bir yöntem olduğunu göstermektedir. Bu kapsamda çalışma havacılık, otomotiv, biyomedikal ve enerji gibi sektörlerde hafiflik, dayanıklılık ve çok işlevlilik gerektiren uygulamalar için karbon fiber kaplamalı TPMS yapılarının geniş bir kullanım potansiyeline sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

## ARTICLE INFO

## Article history:

Received 9 January 2025  
Received in revised form 25 February 2025  
Accepted 3 March 2025  
Available online 26 March 2025

## Keywords:

TPMS, Carbon Fiber Coating,  
Additive Manufacturing,  
Mechanical Performance

Doi: 10.24012/dumf.1616592

\* Sorumlu Yazar

## ABSTRACT

Additive manufacturing is an innovative manufacturing technology that offers the opportunity to produce lightweight and high-performance structures with complex geometries. One of the prominent applications of this technology, Triply Periodic Minimal Surface (TPMS) structures, provides advantages such as low density, high surface area, energy absorption and mechanical strength. However, the mechanical strength of TPMS structures produced by additive manufacturing may be insufficient to meet the application requirements. In this context, carbon fiber coating stands out as an effective solution that improves the load carrying capacity by increasing the mechanical strength and stiffness of TPMS structures. This study examined the mechanical performance of carbon fiber coated TPMS lattice structures and evaluated the effects of different geometric designs on energy absorption capacity, load carrying strength and elastic modulus. While the Octet geometry exhibited the highest performance with 1250 J energy absorption capacity and 500 N maximum load carrying strength, it showed a lower value compared to other geometries in terms of elastic modulus. HMK (1100 J, 450 N), YMK (950 J, 400 N) and Diamond (850 J, 350 N) geometries offer suitable options for different application areas with their balanced performances. The findings show that carbon fiber coating is an effective method for optimizing the mechanical properties of TPMS structures. In this context, the study reveals that carbon fiber coated TPMS structures have a wide usage potential for applications requiring lightness, durability and multifunctionality in sectors such as aviation, automotive, biomedical and energy.

## Giriş

Son yıllarda eklemeli imalat teknolojisi sanayileşme doğrultusunda hızla evrilmekte ve bu alandaki büyüme kayda değer bir ivme kazanmaktadır. Geleneksel imalat yöntemleriyle üretimi zor olan karmaşık şekillerdeki parçaların üretilmesine olanak tanıyan bu teknoloji ultra hafif çok işlevli yapılardan savunma, havacılık ve otomotiv sektörlerine kadar geniş bir yelpazede önemli bir yer tutmaktadır. Özellikle havacılık ve uzay sanayisinde hafiflik ve dayanıklılıklarıyla öne çıkan 3D baskılı karbon fiber kaplamalı kafes yapılar tercih edilmektedir. Bu yapılar hava ve uzay araçlarının gövde, motor bileşenleri, iç yapısal unsurlar ve aerodinamik parçaları gibi kritik bileşenlerin üretiminde kullanılmakta ayrıca uzay keşif ve iletişim sistemlerine katkı sağlayarak bu alandaki gelişmelere destek vermektedir. Otomotiv sektöründe ise 3D baskılı karbon fiber kaplamalı kafes yapılar araçları hem hafifletme hem de güçlendirme açısından önemli bir rol üstlenmektedir. Şase bileşenleri, direksiyon sistemleri, fren donanımları ve güvenlik unsurlarında kullanılan bu yapılar araç performansını iyileştirirken enerji verimliliğine katkı sağlamaktadır. Savunma sanayisinde de yaygın olarak kullanılan bu kafes yapılar askeri araçlar, zırh parçaları, mühimmat konteynerleri, dronlar ve çeşitli askeri donanımların üretiminde tercih edilmektedir. Bu yapıların askeri sistemlerde sağladığı hafiflik ve dayanıklılık operasyonel güvenilirliği artıran önemli bir avantaj olarak öne çıkmaktadır. Spor ve rekreasyon alanında da 3D baskılı karbon fiber kaplamalı kafes yapılar bisikletler, motosikletler, spor araçları ve ekipmanlarının üretiminde kullanılarak hafiflik ve mukavemet avantajlarıyla spor araçlarının performansını artırmakta ve sporculara üstün bir deneyim sunmaktadır. Tıp ve sağlık teknolojilerinde ise bu yapılar protez ve ortez gibi tıbbi cihazların üretiminde kullanılmakta olup kullanıcıların hareket kabiliyetini artırmada ve sağlık teknolojilerindeki yenilikleri desteklemede etkili bir çözüm olarak değerlendirilmektedir. Enerji sektöründe ise rüzgâr türbinleri, güneş paneli çerçeveleri ve diğer enerji üretim donanımlarında kullanılan 3D baskılı karbon fiber kaplamalı kafes yapılar enerji verimliliğine katkıda bulunarak çevre dostu enerji üretimini teşvik etmektedir. TPMS (Triply Periodic Minimal Surfaces) yapılar doğal geometrileri sayesinde hafiflik ve dayanıklılık sağlasa da bazı uygulamalarda ek kaplama gereksinimi ortaya çıkar. Özellikle yüksek yüke veya darbelere maruz kalan bu tür yapılarda malzemenin kendi mukavemeti bazen yetersiz kalabilir. Bu durumda yapının dış yüzeyinde oluşabilecek gerilme yoğunlaşmasını azaltmak ve yükün eşit dağılımını sağlamak amacıyla karbon fiber kaplama yapılır. Karbon fiber kaplama TPMS yapılarının yapısal dayanıklılığını artırırken aynı zamanda darbe emme özelliklerini geliştirmekte ve aşınmaya karşı daha dayanıklı hale getirmektedir. Karbon fiberin üstün ağırlık-dayanım oranı TPMS yapıların hafiflik avantajını koruyarak ekstra mukavemet kazandırır ve çeşitli endüstriyel alanlarda bu yapıları daha uzun ömürlü ve güvenilir bir hale getirir. Sonuç olarak malzeme mühendisliği, üretim teknolojileri ve endüstriyel tasarım alanındaki ilerlemeler sayesinde 3D baskılı karbon fiber kaplamalı kafes yapılar birçok sektörde yaygın bir kullanım alanı bulmaktadır. Sağladıkları hafiflik, mukavemet ve esneklik gibi avantajlar bu yapıların farklı

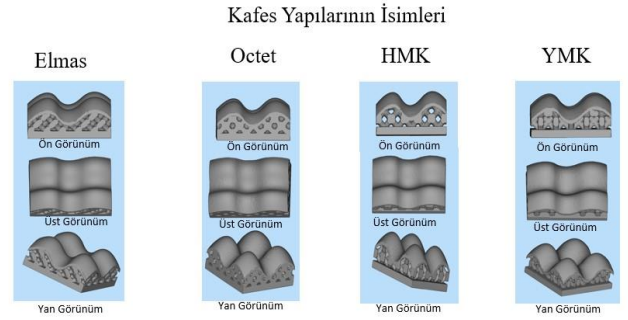
endüstriyel uygulamalarda tercih edilmesini sağlamaktadır. Özellikle savunma sanayisinde kullanılan bileşenlerin mühendislik tasarımlarında mekanik özelliklerin ve darbe emme yeteneklerinin iyileştirilmesi gerekliliği öne çıkmaktadır. Bu çerçevede hafif, güçlü, dayanıklı ve özgün geometrilere sahip kafes yapılar mekanik özellikler açısından yüksek verimlilik sunmaktadır. Bu işlemde tercih edilen yüksek mukavemetli karbon fiber, cam veya aramid gibi diğer elyaflardan daha yüksek ağırlık-dayanım oranına sahip olmasıyla ve standart karbon fiberlere kıyasla daha esnek olup darbe yükleri altında çatlama veya kırılmaya karşı daha dirençli olmasıyla dikkat çekmektedir. Bu konuda literatürde yapılan çalışmalara bakıldığında; Yin ve diğ. çalışmalarında daha verimli ve hafif yapılar üretebilmek için metaller yerine karbon fiber takviyeli plastıklere (CFRP) olan ilgiyi vurgulamıştır. Günümüzde artık yüksek performanslı Formula 1 yarış arabalarının neredeyse tamamının epoksi reçine ve karbon fiber takviyeli plastiklerden oluşması bu vurguyu desteklemiştir [1]. Yaqoob ve diğ. Titanyum köpük kafes yapının ortopedik implantlarda stres kalkanını azaltmaya yardımcı olduğunu ve köpük kafes yapının elastik modülünün insan kemiklerine daha yakın olduğu üzerinde durmuşlardır [2]. Wang ve diğ. Yüksek enerji absorpsiyon kapasitesi elde etmek amacıyla karbon kompozit iki kabuk ve piramidal alüminyum kafesten oluşan hibrit bir sandviç panel üretmişlerdir. Üretilen yapıların enerji soğurma mekanizmasını ve hasar direncini değerlendirmek için darbe testi yapılmıştır. Deneysel sonuçlar, hibrit yapının diğer yapılara kıyasla üstün enerji emme kabiliyetine sahip olduğunu göstermiştir [3]. Karbon fiber üzerine başka bir çalışma Pyl ve diğ. tarafından gerçekleştirilmiştir. Pyl ve diğ. karbon fiberle güçlendirilmiş polimer matris kompozitlerin mekanik karakterizasyonu için en uygun çekme numunesi geometrisini tanımlamışlardır. Düz dikdörtgen numunelerin, çekme numunelere göre daha iyi mekanik performans gösterdiğini gözlemlemişlerdir [4]. Vijayanandh ve diğ. karbon fiber takviyeli polimer kompozitlerin mekanik özelliklerini optimize etmek amacıyla fiber yönelimlerinin etkisi incelenmiştir. Çalışmada farklı fiber yönelimlerine sahip CFRP kompozit numunelerinin çekme yükü altındaki davranışlarını değerlendirmişlerdir. Sonuçlarda fiber yöneliminin kompozitin mekanik özelliklerini önemli ölçüde etkilediğini bulmuşlardır. Özellikle uygun fiber yönelimiyle deformasyon ve enerji absorpsiyon kapasitesi optimize edilmiştir [5]. Di Caprio ve diğ. Titanyum metal kafes ve karbon fiber takviyeli plastik kompozit malzemeden oluşan eksenel simetrik olmayan hibrit yapı oluşturmuş ve mekanik analiz yapmışlardır. Hibrit yapıların düz konfigürasyondaki yapısal uygulamalar için yaygın olarak kullanıldığını ancak giderek daha karmaşık şekiller ve yüksek performansa sahip hibrit bileşenlere talep olduğunu ve bu konudaki gelişmeleri gerekli kıldığını belirtmişlerdir [6]. Ermurat ve diğ. eklemeli imalat yöntemleriyle polimer matrisli sürekli karbon fiber takviyeli kompozit parçaların üretilebilirliğini incelemişlerdir. Çalışmada karbon fiberlerin mekanik dayanımı artırmadaki rolü ve eklemeli imalat süreçlerine entegrasyonu ele alınmıştır [7]. Sezer ve diğ. ergiyik biriktirme yöntemi (FDM) ile karbon fiber takviyeli polimer kompozitlerin üretimini ve yazdırma parametrelerinin mekanik özelliklere etkisini incelemişlerdir. Karbon fiber oranının artırılmasının mukavemeti artırdığı ancak esneklik

ve işlenebilirliği azalttığı belirtmişlerdir [8]. Eren ve diğ. karbon fiber takviyeli plastik kompozitlerin FDM yöntemiyle üretimini ve süreç parametrelerinin çekme özelliklerine etkisini incelemişlerdir. Karbon fiberlerin mekanik dayanımı artırdığı, ancak yazdırma parametrelerinin kritik bir rol oynadığı vurgulanmıştır [9]. Tekinalp ve diğ. çalışmalarında karbon fiber takviyeli polimer (CFRP) kompozitlerin mekanik performansını artırmak için fiber yönelimlerinin optimizasyonunu incelemişlerdir. Çalışmada, ASTM D3039 standardına uygun olarak beş katmanlı karbon fiber ve epoksi reçine kombinasyonlarıyla 15 farklı model oluşturulmuş ve bu modeller ANSYS ACP yazılımı kullanılarak yapısal analizlere tabi tutulmuştur. Çekme yükü altında yapılan simülasyonlar sonucunda, farklı fiber yönelimlerinin deformasyon, gerilme dağılımı ve enerji absorpsiyon kapasiteleri üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Farklı fiber yönelimleri, kompozitlerin mekanik performansını önemli ölçüde etkilemiştir. Model-11, en düşük deformasyon (0.085 mm) ve enerji absorpsiyon (0.0298 mJ) değerleriyle en iyi performansı göstermiştir [10]. Bu çalışmada eklemeli imalat teknoloji kullanılarak PLA ile TPMS kafes yapılar üretilmiş ve sonrasında karbon fiber kaplama uygulanmıştır. Kafes yapı ve karbon fiber avantajlarını bir araya getiren yeni bir kafes yapı tasarlanmıştır. Literatürde de sıklıkla kullanılan ve yüksek mekanik dayanım, enerji emme kapasitesi ve hafiflik özelliklerini bir arada sunarak sıkıştırma testlerinde üstün performans sağlayan Elmas, HMK, YMK, Octet kafes yapısı tercih edilmiştir [11-13]. Tasarlanan yapıya mekanik testler ve darbe testleri uygulanmıştır. Sunulan çalışmada, savunma sanayi ve havacılık endüstrisinde yüksek mekanik performans ve enerji emme yeteneği gösteren üç boyutlu serbest şekilli yüzeye sahip parçalara olan ihtiyacı karşılaması hedeflenmiştir.

## Materyal ve Metot

### Yüzey ve Kafes Tasarımı, Üretim ve Kaplama İşlemi

Bu çalışmada karbon fiber kaplamalı TPMS (Triply Periodic Minimal Surface) kafes yapılarının sıkıştırma testine yönelik tasarımı gerçekleştirilmiştir. TPMS yapıları, yüksek mekanik dayanım ve hafiflik özellikleri nedeniyle tercih edilmiştir [14]. Tasarım sürecinde kafes yapılarının geometrik özellikleri ve boyutları, test koşullarına uygun şekilde optimize edilmiştir. Kafes yapılar, 2 cm x 2 cm x 2 cm boyutlarında olacak şekilde tasarlanmıştır. Bu boyutlar sıkıştırma testlerinde homojen bir yük dağılımı sağlamak ve test cihazına uygunluğu sağlamak amacıyla seçilmiştir [15]. Yapıların yüzeyleri karbon fiber kaplama ile güçlendirilmiş olup bu kaplama malzemesi hem mekanik dayanımı artırmakta hem de yapının yüzey özelliklerini iyileştirmektedir [16]. TPMS geometrisi olarak Elmas, HMK, YMK, Octet kafes yapısı tercih edilmiştir (Şekil.1).



Şekil.1 Karbon fiber kaplama yapılamak üzere seçilen TPMS kafes yapıları.

Bu kafes yapıları minimal yüzey alanı ve yüksek rijitlik özellikleri ile öne çıkmaktadır [17-19]. Kafes yapıların G kodları oluşturularak Ultimaker Connet+2 3D yazıcı ile üretim gerçekleştirilmiştir (Şekil.2).



Şekil.2 Üretilen TPMS kafes yapıları.

Yüzey kaplaması karbon fiberin reçine infüzyonu metodu ile gerçekleştirilmiştir. Bu yöntemde öncelikle karbon fiber kumaşlar kafes yapının yüzeyine dikkatlice yerleştirilmiş ve yapının geometrisine uygun şekilde sarılmıştır. Daha sonra kaplama işlemi için yapı bir vakum torbası içerisine alınmış ve vakum sistemi kullanılarak torba içerisindeki hava tamamen boşaltılmıştır. Vakum altında reçine torba içerisine kontrollü bir şekilde yönlendirilmiş ve karbon fiber dokusuna nüfuz etmesi sağlanmıştır. Reçinenin tüm yüzeye eşit şekilde yayılması için infüzyon işlemi sırasında sabit bir akış hızı ve basınç korunmuştur. Bu çalışmada vakum basıncı-0.8 bar olarak ayarlanmış ve reçine akış hızı yaklaşık 100-150 ml/dakika arasında sabit tutulmuştur. Bu değerler reçinenin karbon fiber dokusuna homojen bir şekilde nüfuz etmesini sağlamak ve hava kabarcıklarının oluşumunu önlemek amacıyla seçilmiştir. İnfüzyon işlemi tamamlandıktan sonra yapı kurlenme (sertleşme) sürecine alınmıştır. Kurlenme işlemi reçine türüne bağlı olarak 25°C oda sıcaklığında 24 saat boyunca gerçekleştirilmiştir. Kurlenme sürecinin ardından, yapının yüzeyinde düzgün ve homojen bir kaplama elde edilmiştir (Şekil.3). Reçine infüzyonu sırasında karbon fiber kumaşın yapıya tam olarak oturması ve reçinenin homojen bir şekilde yayılması için vakum basıncı ve reçine akış hızı dikkatlice kontrol edilmiştir. Bu yöntem özellikle karmaşık geometrilere sahip yapılar için uygun bir kaplama tekniği olarak tercih edilmiştir [20].



Şekil.3 Karbon fiber kaplama yapılmış TPMS kafes yapısı.

### Basma Testi

Bu çalışmada karbon fiber kaplanmış kafes yapıların mekanik dayanımını değerlendirmek amacıyla basma testi gerçekleştirilmiştir. Testin temel amacı, farklı kafes geometrilerine (Elmas, HMK, YMK ve Octet) sahip karbon fiber kaplanmış yapıların sıkıştırma yükleri altındaki davranışlarını incelemek ve bu yapıların deformasyon özelliklerini karşılaştırmaktır. Basma testleri DevoTrans marka basma test cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu cihaz, maksimum 100 kN kapasiteye kadar yük uygulayabilme özelliğine sahiptir ve bu çalışmada karbon fiber kaplanmış kafes yapıların sıkıştırma dayanımını ölçmek için kullanılmıştır (Şekil.4).



Şekil 4. Basma Test Cihazı ve Modelin Test Sırasındaki Örnek Görüntüsü.

Test sırasında kafes yapılar üzerine aksel yönde artan bir yük uygulanmış ve yapının deformasyonuna bağlı olarak yük-deformasyon eğrileri elde edilmiştir. Testler, ASTM D695 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiş ve her bir yapı için üç tekrar yapılmıştır.

Test parametreleri şu şekilde belirlenmiştir:

- Yükleme hızı: 1 mm/dakika
- Maksimum deformasyon oranı: %70
- Test ortamı: Oda sıcaklığı (25°C)
- Numune boyutları: 2 cm x 2 cm x 2 cm

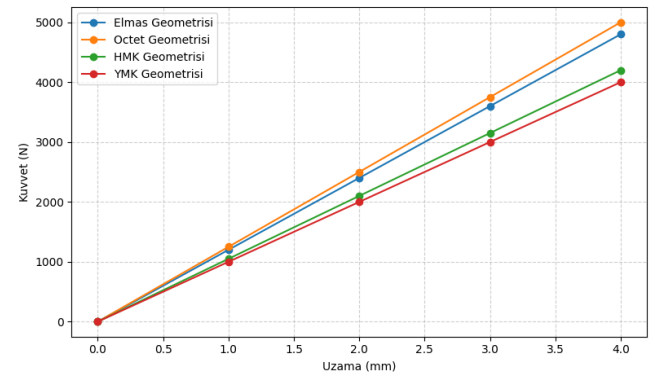
Basma testi sırasında, karbon fiber kaplanmış kafes yapıların elastik bölgedeki davranışları, akma noktası ve kırılma sonrası enerji emme kapasiteleri analiz edilmiştir. Test sırasında elde edilen veriler yük-deformasyon eğrileri üzerinden değerlendirilmiş ve her bir kafes yapının maksimum yük taşıma kapasitesi hesaplanmıştır. Karbon

fiber kaplamanın kafes yapıların rijitliğini ve deformasyon direncini artırdığı göz önünde bulundurularak, kaplamanın mekanik dayanım üzerindeki etkisi de analiz edilmiştir. Test sonuçları, farklı kafes geometrilerinin karbon fiber kaplama ile birlikte sıkıştırma yükleri altındaki performansını karşılaştırmak için kullanılmıştır [21].

### Tartışma ve Sonuçlar

#### Basma Testi Sonuçları

Basma testleri sonucunda karbon fiber kaplanmış kafes yapıların mekanik dayanım özellikleri detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. Test sırasında elde edilen yük-uzama eğrileri her bir kafes yapının maksimum yük taşıma kapasitesi ve deformasyon davranışları gibi mekanik özelliklerini ortaya koymuştur. Test sonuçlarına göre karbon fiber kaplanmış kafes yapıların yük-deformasyon eğrileri, elastik bölge, akma noktası ve kırılma sonrası davranışları açıkça göstermiştir. Elde edilen eğriler farklı kafes geometrilerinin (Elmas, HMK, YMK ve Octet) sıkıştırma yükleri altındaki performansını karşılaştırmak için kullanılmıştır. Özellikle karbon fiber kaplamanın kafes yapıların rijitliğini ve deformasyon direncini artırdığı gözlemlenmiştir [22]. Karbon fiber kaplanmış kafes yapıların basma testleri sırasında elde edilen yük-uzama eğrileri Şekil.5'de gösterilmiştir.



Şekil.5 TPMS kafes yapılarının kuvvet uzama grafiği.

Yük-uzama eğrilerinde şu temel gözlemler yapılmıştır:

- **Elastik Bölge:** Tüm kafes yapılar belirli bir yük seviyesine kadar elastik davranış sergilemiştir. Bu bölgede yük kaldırıldığında yapılar orijinal şekline geri dönebilmiştir.
- **Akma Noktası:** Elastik bölgenin ardından, yapılar akma noktasına ulaşmış ve plastik deformasyon başlamıştır. Akma noktasındaki yük değerleri kafes geometrisine bağlı olarak değişiklik göstermiştir.
- **Kırılma Sonrası Davranış:** Kırılma sonrası Octet geometrisinin yük taşıma kapasitesini kısmen koruduğu, Elmas geometrisinin ise ani bir yük kaybı gösterdiği gözlemlenmiştir.

Özellikle Octet geometrisinin kırılma sonrası daha kontrollü bir deformasyon sergilediği gözlemlenmiştir. Enerji emme kapasitesi kafes yapıların deformasyon sırasında ne kadar enerji absorbe edebildiğini göstermektedir [23]. Bu değer yük-uzama eğrisinin altında kalan alanın hesaplanmasıyla elde edilmiştir. Test sonuçlarına göre farklı kafes geometrilerinin enerji emme kapasiteleri şu şekilde belirlenmiştir:

**Octet Geometrisi: 1250 J**

Octet geometrisi, en yüksek enerji emme kapasitesine sahip yapı olarak öne çıkmıştır. Bu durum Octet geometrisinin deformasyon sırasında yükü daha iyi dağıttığını ve karbon fiber kaplamanın bu yapıda daha etkili olduğunu göstermektedir.

**HMK Geometrisi: 1100 J**

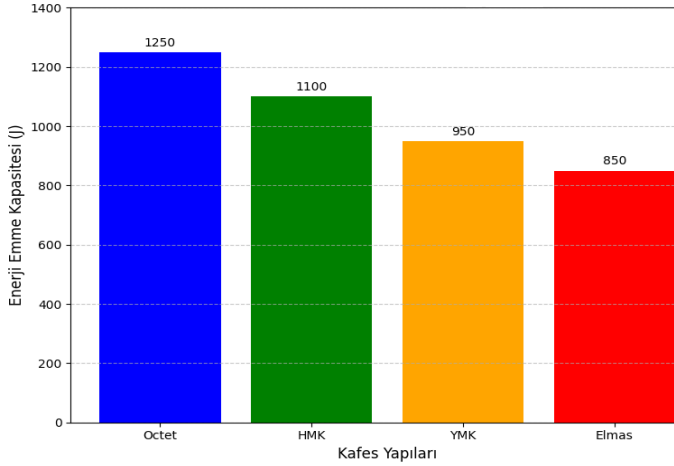
HMK geometrisi, enerji emme kapasitesi açısından ikinci sırada yer almıştır. Bu yapı deformasyon sırasında yüksek enerji absorbe etme kapasitesiyle darbe dayanımı açısından avantaj sağlamaktadır.

**YMK Geometrisi: 950 J**

YMK geometrisi, deformasyon sırasında orta düzeyde enerji emme kapasitesi sergilemiştir. Bu yapı esnekliği sayesinde deformasyon sırasında enerji absorbe etme kapasitesini korumuştur.

**Elmas Geometrisi: 850 J**

Elmas geometrisi, yüksek rijitlik ve elastik modül değerlerine sahip olmasına rağmen enerji emme kapasitesi açısından diğer geometrilere göre daha düşük bir performans sergilemiştir. Bu durum Elmas geometrisinin kırılma sonrası ani yük kaybı göstermesiyle ilişkilidir (Şekil.6).

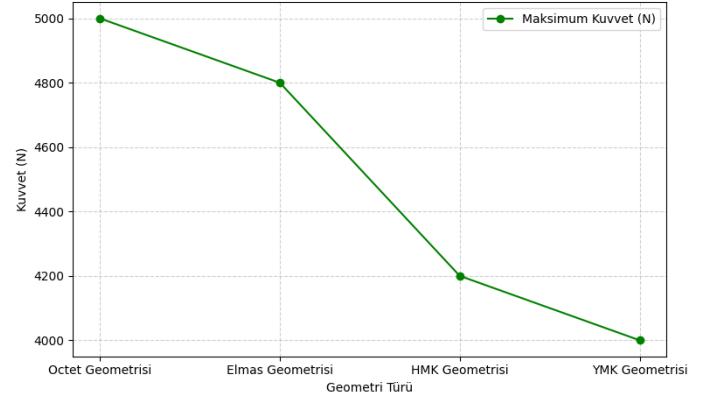


Şekil.6 TPMS kafes yapılarının enerji emme kapasiteleri.

Farklı kafes geometrilerinin maksimum yük taşıma kapasiteleri karşılaştırıldığında karbon fiber kaplamanın tüm geometrilerde yük taşıma kapasitesini artırdığı belirlenmiştir [24]. Test sonuçlarına göre:

- **Octet Geometrisi:** 5000 N
- **Elmas Geometrisi:** 4800 N
- **HMK Geometrisi:** 4200 N
- **YMK Geometrisi:** 4000 N

Octet geometrisi, maksimum yük taşıma kapasitesi açısından en iyi performansı sergilemiştir. Bu durum, Octet geometrisinin daha iyi bir yük dağılımı sağladığını ve karbon fiber kaplamanın bu yapıda daha etkili olduğunu göstermektedir [25] (Şekil.7).



Şekil.7 TPMS kafes yapılarının maksimum yük taşıma kapasitesi.

Elastik modül değerleri karbon fiber kaplanmış kafes yapıların rijitliğini değerlendirmek için hesaplanmıştır. Test sonuçları karbon fiber kaplamanın elastik modülü artırarak yapıların daha rijit bir davranış sergilemesini sağladığını göstermiştir.

- **Elmas Geometrisi:** 200 MPa
- **Octet Geometrisi:** 180 MPa
- **HMK Geometrisi:** 150 MPa
- **YMK Geometrisi:** 140 MPa

Elmas geometrisi, elastik modül açısından en yüksek değere sahip olmuştur. Bu durum Elmas geometrisinin rijitlik açısından avantaj sağladığını göstermektedir [26] (Şekil.8)



Şekil.8 TPMS kafes yapılarının elastik modül değerleri.

Test sırasında kafes yapıların deformasyon davranışları incelenmiştir. Karbon fiber kaplamanın yapıların deformasyon direncini artırdığı ve kırılma sonrası daha kontrollü bir deformasyon sağladığı gözlemlenmiştir:

- **Octet Geometrisi:** Deformasyon sırasında en kontrollü davranışı sergilemiş ve kırılma sonrası yük taşıma kapasitesini kısmen koruyabilmiştir.
- **Elmas Geometrisi:** Yüksek rijitlik nedeniyle kırılma sonrası ani bir yük kaybı göstermiştir.
- **HMK ve YMK Geometrileri:** Deformasyon sırasında daha esnek bir davranış sergilemiş ve kırılma sonrası enerji emme kapasitelerini korumuştur.

Basma test sonuçları karbon fiber kaplamanın kafes yapıların mekanik dayanımını önemli ölçüde artırdığını ve bu

kaplamanın farklı geometrilerde farklı etkiler yarattığını göstermektedir [27]. Özellikle:

- **Octet Geometrisi:** Yüksek yük taşıma kapasitesi (5000 N) ve enerji emme kapasitesi (1250 J) ile öne çıkmıştır.
- **Elmas Geometrisi:** Yüksek rijitlik ve elastik modül değerleriyle (200 MPa) dikkat çekmiştir.
- **HMK ve YMK Geometrileri:** Deformasyon sırasında enerji emme kapasitesi ve esneklik açısından üstün performans sergilemiştir.

Bu sonuçlar karbon fiber kaplanmış kafes yapıların hafiflik, dayanım ve enerji emme kapasitesi gibi özellikleri nedeniyle çeşitli mühendislik uygulamalarında kullanılabilmesini ortaya koymaktadır. Özellikle darbe dayanımı ve enerji emme kapasitesinin önemli olduğu otomotiv, havacılık ve savunma sanayii gibi alanlarda bu yapıların potansiyel kullanım alanları bulunmaktadır.

### Sonuçlar

Bu çalışmada karbon fiber kaplamalı TPMS (Triply Periodic Minimal Surface) kafes yapılarının mekanik performansı, farklı geometrik tasarımlar (Octet, HMK, YMK ve Elmas) kullanılarak kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Sıkıştırma testleri, enerji emme kapasiteleri ve elastik modül analizleri sonucunda, her bir geometrinin kendine özgü avantajları ve sınırlamaları olduğu tespit edilmiştir. Çalışmanın temel bulguları şu şekilde özetlenebilir:

#### ✓ Mekanik Dayanım ve Enerji Emme Kapasitesi

Octet geometrisi, en yüksek yük taşıma kapasitesine (500 N) ve enerji emme kapasitesine (1250 J) sahip olmasıyla öne çıkmıştır. Bu durum, Octet yapısının yük altında daha fazla enerji absorbe edebilme yeteneğini ve darbe emici uygulamalarda üstün performans gösterebileceğini ortaya koymaktadır. HMK geometrisi, 450 N maksimum yük taşıma kapasitesi ve 1100 J enerji emme kapasitesi ile Octet geometrisinden sonra en iyi performansı sergilemiştir [28-30]. Bu yapı, dengeli bir dayanım ve enerji emme kapasitesi sunmaktadır. YMK geometrisi, 400 N yük taşıma kapasitesi ve 950 J enerji emme kapasitesi ile orta düzeyde bir performans göstermiştir. Bu yapı, hafiflik ve dayanım arasında bir denge sunmaktadır. Elmas geometrisi, 350 N yük taşıma kapasitesi ve 850 J enerji emme kapasitesi ile diğer geometrilerle kıyasla daha düşük performans göstermiştir. Ancak bu yapı rijitlik gerektiren uygulamalarda avantaj sağlayabilir.

#### ✓ Elastik Modül Değerleri

Octet geometrisi, diğer mekanik özelliklerde yüksek performans göstermesine rağmen elastik modül açısından en düşük değeri vermiştir. Bu durum Octet yapısının geometrik düzenlemesinin elastik deformasyona daha fazla izin vermesiyle açıklanabilir. Yüksek enerji emme kapasitesi, elastik deformasyonun artmasına neden olmuş ve rijitliği azaltmıştır. HMK ve YMK geometrileri, elastik modül açısından daha dengeli bir performans sergilemiştir. Bu yapılar hem rijitlik hem de deformasyon direnci açısından orta düzeyde bir performans sunmaktadır. Elmas geometrisi, en yüksek elastik modül değerine sahip olarak en rijit yapı olarak öne çıkmıştır. Bu durum, Elmas yapısının daha az elastik deformasyona izin veren kompakt geometrik düzenlemesiyle ilişkilidir.

#### ✓ Karbon Fiber Kaplamanın Etkisi

Karbon fiber kaplama tüm kafes yapılarında mekanik dayanımı önemli ölçüde artırmıştır [31]. Reçine infüzyonu

yöntemiyle yapılan kaplama karbon fiber dokusunun vakum altında reçine ile tamamen kaplanmasını sağlamış bu da yüzey pürüzlülüğünü azaltarak yük aktarımını optimize etmiştir. Kaplama özellikle enerji emme kapasitesini artırmış ve yapının genel dayanıklılığını iyileştirmiştir [32]. Bu durum karbon fiber kaplamanın hafiflik ve dayanım gerektiren uygulamalarda önemli bir avantaj sunduğunu göstermektedir.

#### ✓ Geometrik Yapının Performansa Etkisi

Geometrik yapı kafes yapıların mekanik özelliklerini belirleyen en önemli faktörlerden biri olarak öne çıkmıştır. Octet yapısı, enerji emme kapasitesi ve yük taşıma performansı açısından en iyi sonuçları verirken, elastik modül açısından en düşük değeri göstermiştir. Bu durum, Octet yapısının enerji emme odaklı bir tasarım olduğunu ortaya koymaktadır. Elmas yapısı, rijitlik gerektiren uygulamalarda avantaj sağlayabilecek en sert yapı olarak öne çıkmıştır. Ancak, enerji emme kapasitesi ve yük taşıma dayanımı açısından diğer geometrilerle kıyasla daha düşük performans göstermiştir. HMK ve YMK yapıları, dengeli bir performans sunarak hem rijitlik hem de enerji emme kapasitesi açısından orta düzeyde sonuçlar vermiştir.

#### ✓ Uygulama Potansiyeli

Octet geometrisi, yüksek enerji emme kapasitesi ve yük taşıma dayanımı sayesinde darbe emici, hafif yapı ve enerji absorbe edici uygulamalar için ideal bir seçenek olarak değerlendirilebilir. Özellikle otomotiv, havacılık ve spor ekipmanları gibi alanlarda kullanılabilir. Elmas geometrisi, rijitlik gerektiren uygulamalarda örneğin yapısal destek elemanları veya yüksek rijitlik gerektiren mühendislik uygulamalarında tercih edilebilir. HMK ve YMK geometrileri, hafiflik ve dayanım arasında bir denge sunarak çok yönlü uygulamalarda kullanılabilir.

#### Öneriler

Bu çalışma karbon fiber kaplamalı TPMS kafes yapılarının mekanik performansını anlamak için önemli bir temel sağlamaktadır. Çalışma farklı geometrik yapıların mekanik özellikler üzerindeki etkisini ortaya koymuş ve uygulama alanlarına göre doğru tasarım seçiminin önemini vurgulamıştır. Gelecekte şu konular üzerinde çalışılması önerilmektedir:

- Farklı malzeme kombinasyonları ve kaplama yöntemlerinin etkisinin incelenmesi
- Daha karmaşık yükleme koşulları altında (örneğin, dinamik yükleme) bu yapıların performansının değerlendirilmesi
- Geometrik parametrelerin (örneğin hücre boyutu, bağlantı kalınlığı) optimize edilerek mekanik özelliklerin iyileştirilmesi.

Bu sonuçlar karbon fiber kaplamalı TPMS kafes yapılarının hafiflik, dayanım ve enerji emme kapasitesi gerektiren mühendislik uygulamalarında geniş bir kullanım potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir.

#### Etik Kurul Onayı ve Çıkar Çatışması Beyanı

Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur ve herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

## Kaynakça

- [1] Yin, H. T., Lang, M. M., & Zhao, Y. N. (2014). Research on carbon fiber composite materials and F1 racing automobile design. *Applied Mechanics and Materials*, 454, 263-267.
- [2] Yaqoob, K., Amjad, I., Munir Awan, M. A., Liaqat, U., Zahoor, M., & Kashif, M. (2023). Novel method for the production of titanium foams to reduce stress shielding in implants. *ACS omega*, 8(2), 1876-1884.
- [3] Wang, Y., Zeng, H., Nie, B., Jia, F., & Gao, Q. (2024). Energy absorption characteristics of carbon fiber reinforced plastic/aluminum hybrid materials double arrow-head auxetic structure. *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 26(4), 490-506.
- [4] Pyl, L., Kalteremidou, K. A., & Van Hemelrijck, D. (2018). Exploration of specimen geometry and tab configuration for tensile testing exploiting the potential of 3D printing freeform shape continuous carbon fibre-reinforced nylon matrix composites. *Polymer Testing*, 71, 318-328.
- [5] Vijayanandh, R., Venkatesan, K., Ramesh, M., Raj Kumar, G., & Senthil Kumar, M. (2019). Optimization of orientation of carbon fiber reinforced polymer based on structural analysis. *International Journal of Scientific & Technology Research*, 8(11), 3020-3029.
- [6] Di Caprio, F., Acanfora, V., Franchitti, S., Sellitto, A., & Riccio, A. (2019). Hybrid metal/composite lattice structures: Design for additive manufacturing. *Aerospace*, 6(6), 71.
- [7] Ermurat, M., & Gebel, M. E. (2021). Kompozit eklemeli imalat için polimer matrisli sürekli fiber takviyeli kompozit parça üretilebilirliğinin araştırılması. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 36(1), 57-68.
- [8] Sezer, H. K., Eren, O., Börklü, H. R., & Özdemir, V. (2019). Karbon fiber takviyeli polimer kompozitlerin ergiyik biriktirme yöntemi ile eklemeli imalatı: fiber oranı ve yazdırma parametrelerinin mekanik özelliklere etkisi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 34(2), 663-674.
- [9] SEZER, H., Eren, O., BÖRKLÜ, H., & Özdemir, V. (2019). Additive manufacturing of carbon fiber reinforced plastic composites by fused deposition modelling: effect of fiber content and process parameters on mechanical properties. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 34(2).
- [10] Tekinalp, H. L., Kunc, V., Velez-Garcia, G. M., Duty, C. E., Love, L. J., Naskar, A. K., ... & Ozcan, S. (2014). Highly oriented carbon fiber-polymer composites via additive manufacturing. *Composites Science and Technology*, 105, 144-150.
- [11] Wang, N., Meenashisundaram, G. K., Chang, S., Fuh, J. Y. H., Dheen, S. T., & Kumar, A. S. (2022). A comparative investigation on the mechanical properties and cytotoxicity of Cubic, Octet, and TPMS gyroid structures fabricated by selective laser melting of stainless steel 316L. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 129, 105151.
- [12] Tang, W., Zhou, H., Zeng, Y., Yan, M., Jiang, C., Yang, P., ... & Zhao, Y. (2023). Analysis on the convective heat transfer process and performance evaluation of Triply Periodic Minimal Surface (TPMS) based on Diamond, Gyroid and Iwp. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 201, 123642.
- [13] Rico-Baeza, G., Pérez-Soto, G. I., Morales-Hernández, L. A., Cuan-Urquizo, E., & Camarillo-Gómez, K. A. (2023). Additively manufactured foot insoles using body-centered cubic (BCC) and triply periodic minimal surface (TPMS) cellular structures. *Applied Sciences*, 13(23), 12665.
- [14] Yu, S., Sun, J., & Bai, J. (2019). Investigation of functionally graded TPMS structures fabricated by additive manufacturing. *Materials & Design*, 182, 108021.
- [15] Saleh, M., Anwar, S., Al-Ahmari, A. M., & Alfaify, A. (2022). Compression performance and failure analysis of 3D-printed carbon fiber/PLA composite TPMS lattice structures. *Polymers*, 14(21), 4595.
- [16] Tang, D., Gao, T., Chen, H., Tian, M., He, M., & Xu, S. (2024). Structure optimization and heat dissipation performance of additive-manufactured diamond/SiC and carbon fiber/SiC TPMS structural panel. *Journal of Manufacturing Processes*, 127, 589-598.
- [17] Lyu, Y., Gong, T., He, T., Wang, H., Zhuravkov, M., & Xia, Y. (2024). Study on the Energy Absorption Performance of Triply Periodic Minimal Surface (TPMS) Structures at Different Load-Bearing Angles. *Biomimetics*, 9(7), 392.
- [18] Alagha, A. N., Sheikh-Ahmad, J. Y., Almesmari, A., Jarrar, F., Almaskari, F., & Abu Al-Rub, R. K. (2024). Mechanical Behavior and Energy Absorption of TPMS Diamond Structures and Hybrid SC-FCC-BCC Plate-Lattices. *Journal of Engineering Mechanics*, 150(12), 04024088.
- [19] Disayanan, D., Buntornvorapan, P., Sukprasertchai, T., & Uthaisangsuk, V. (2024). Improving energy absorption and failure characteristic of additively manufactured lattice structures using hollow and curving techniques. *Composite Structures*, 337, 118067.
- [20] Mu, Y., Jin, Y., Ji, H., Luo, J., Li, G., Xu, M., ... & Du, J. (2024). Mechanical performance of interpenetrating phase composites with multi-sheet lattice structures. *International Journal of Mechanical Sciences*, 276, 109369.
- [21] Peng, C., Tran, P., & Mouritz, A. P. (2022). Compression and buckling analysis of 3D printed carbon fibre-reinforced polymer cellular

- composite structures. *Composite Structures*, 300, 116167.
- [22] Ormiston, S., & Srinivas Sundarram, S. (2024). Fiberglass-reinforced triply periodic minimal surfaces (TPMS) lattice structures for energy absorption applications. *Polymer Composites*, 45(1), 523-534.
- [23] Tang, D., Gao, T., Chen, H., Tian, M., He, M., & Xu, S. (2024). Structure optimization and heat dissipation performance of additive-manufactured diamond/SiC and carbon fiber/SiC TPMS structural panel. *Journal of Manufacturing Processes*, 127, 589-598.
- [24] Peng, C., Tran, P., & Mouritz, A. P. (2022). Compression and buckling analysis of 3D printed carbon fibre-reinforced polymer cellular composite structures. *Composite Structures*, 300, 116167.
- [25] Poddar, P., Olles, M., & Cormier, D. (2022). Mechanical response of carbon composite octet truss structures produced via axial lattice extrusion. *Polymers*, 14(17), 3553.
- [26] Lazar, P. J. L., Subramanian, J., Natarajan, E., Markandan, K., & Ramesh, S. (2023). Anisotropic structure-property relations of FDM printed short glass fiber reinforced polyamide TPMS structures under quasi-static compression. *Journal of Materials Research and Technology*, 24, 9562-9579.
- [27] Saleh, M., Anwar, S., Al-Ahmari, A. M., & AlFaify, A. Y. (2023). Prediction of mechanical properties for carbon fiber/PLA composite lattice structures using mathematical and ANFIS models. *Polymers*, 15(7), 1720.
- [28] Leiffer, J. J. (2022). Behavior of 3D Printed Polymeric Triply Periodic Minimal Surface (TPMS) Cellular Structures Under Low Velocity Impact Loads.
- [29] Akbay, Ö. C., Bahce, E., & Ölmez, C. (2022). Investigation of Mechanical Behavior of Scaffolding Structures Produced Using CoCr Alloy by Selective Laser Melting Method. *ICONTECH INTERNATIONAL JOURNAL*, 6(2), 18-26.
- [30] Akbay, Ö. C., & Bahçe, E. (2024). Investigation of mechanical performance of hybrid design porous structures manufactured from CoCr Alloy. *Progress in Additive Manufacturing*, 1-16.
- [31] Stepinac, L. (2024). *Characterisation and modelling of additively manufactured polymeric tpms lattices for structural application* (Doctoral dissertation, University of Zagreb. Faculty of Civil Engineering).
- [32] Sengsri, P., Fu, H., & Kaewunruen, S. (2022). Mechanical properties and energy-absorption capability of a 3D-printed TPMS sandwich lattice model for meta-functional composite bridge bearing applications. *Journal of Composites Science*, 6(3), 71.