Gazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Dergisi
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

Gazi University
Journal of Science
PART C: DESIGN AND TECHNOLOGY

GU J Sci, Part C, 14(2): 1124-1155 (2026)

A Systematic Review of Energy Absorption in Functionally Graded Lattice Structures

İlkay GÜNEL[1*], Ömer KELEŞ[1]

[1] *Gazi University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Mechanical Engineering, Ankara, Turkey*

Article Info

Research article
Received: 06/02/2026
Revision: 25/05/2026
Accepted: 06/06/2026

Keywords

Functionally Graded Lattice Structures, Energy Absorption, Additive Manufacturing

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 06/02/2026
Düzeltme: 25/05/2026
Kabul: 06/06/2026

Anahtar Kelimeler

Fonksiyonel Gradyanlı Kafes Yapılar, Enerji Sönümleme, Katmanlı İmalat

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

Functional graded lattice structures (FGLSs), produced through additive manufacturing, are innovative architectures with gradually varying properties such as density and cell geometry. This study reviews recent experimental and numerical research on the energ y absorption performance of FGLSs. Design strategies, unit cell topologies, manufacturing methods, materials, and performance metrics are evaluated, while their applications in aerospace, automotive, and biomedical industries are discussed. Current challenges and future research directions are also highlighted. / Fonksiyonel gradyanlı kafes yapılar (FGKY), katmanlı imalatla üretilen, yoğunluk ve hücre geometrisi gibi özellikleri kademeli değişen yenilikçi yapılardır. Bu çalışma, FGKY'lerin enerji sönümleme performansını inceleyen güncel deneysel ve sayısal araştırmaları derlemektedir. Tasarım stratejileri, hücre topolojileri, üretim yöntemleri, malzemeler ve performans ölçütleri değerlendirilmiş; havacılık, otomotiv ve biyomedikal uygulamaları ile mevcut zorluklar ve gelecekteki araştırma yönelimleri tartışılmıştır.



Figure A. *Lattice structures in nature: (a) NaCl crystal structure; (b) Animal bone microstructure; (c) Plant stem microstructure; (d) Honeycomb /* ***Şekil A.*** *Doğadaki kafes yapılar; (a) NaCl kristal yapısı; (b) Hayvan kemiği mikroyapısı; (c) Bitki gövdesinin mikroyapısı; (d) Balpeteği*

Highlights (Önemli noktalar)

- *Functionally graded lattice structures improve energy absorption performance through gradient design. / Fonksiyonel gradyanlı kafes yapılar, gradyan tasarım sayesinde enerji sönümleme performansını artırmaktadır.*
- *Additive manufacturing enables the fabrication of complex lattice architectures. / Katmanlı imalat, karmaşık kafes mimarilerinin üretimini mümkün kılmaktadır.*
- *Hybrid and TPMS-based structures provide enhanced mechanical performance. / Hibrit ve TPMS tabanlı yapılar gelişmiş mekanik performans sunmaktadır.*

Aim (Amaç): *This study aims to review recent studies on the energy absorption performance of functionally graded lattice structures and evaluate their design approaches and application areas. / Bu çalışma, fonksiyonel gradyanlı kafes yapıların enerji sönümleme performansına ilişkin güncel çalışmaları incelemeyi ve tasarım yaklaşımları ile uygulama alanlarını değerlendirmeyi amaçlamaktadır.*

Originality (Özgünlük): *This review summarizes gradient strategies, materials, and current research trends while identifying research gaps in the field. / Bu derleme, gradyan stratejilerini, kullanılan malzemeleri ve güncel araştırma eğilimlerini özetleyerek alandaki araştırma boşluklarını ortaya koymaktadır.*

Results (Bulgular): *Gradient designs significantly enhance specific energy absorption, while hybrid and multi-material structures exhibit superior damping efficiency compared with uniform lattices. / Gradyan tasarımları özgül enerji sönümleme kapasitesini önemli ölçüde artırırken, hibrit ve çok malzemeli yapılar üniform kafeslere kıyasla üstün sönümleme verimliliği göstermektedir.*

Conclusion (Sonuç): *Functionally graded lattice structures have strong potential for aerospace, automotive, biomedical, and defense applications owing to their lightweight and high energy absorption capabilities. / Fonksiyonel gradyanlı kafes yapılar, hafiflikleri ve yüksek enerji sönümleme yetenekleri sayesinde havacılık, otomotiv, biyomedikal ve savunma uygulamalarında önemli bir potansiyele sahiptir.*

*Corresponding author, e-mail: ilkay.gunel@gazi.edu.tr
DOI: 10.29109/gujsc.1883221

GU J Sci, Part C, 14(2): 1124-1155 (2026)

Gazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Dergisi
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

Gazi University
Journal of Science
PART C: DESIGN AND TECHNOLOGY

http://dergipark.gov.tr/gujsc

Fonksiyonel Gradyanlı Kafes Yapılarda Enerji Sönümleme Kapasitesi için Sistematik İnceleme

İlkay GÜNEL[1*], Ömer KELEŞ[1]

[1] *Gazi University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Mechanical Engineering, Ankara, Turkey*

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 06/02/2026
Düzeltme: 25/05/2026
Kabul: 06/06/2026

Anahtar Kelimeler

Fonksiyonel Gradyanlı Kafes Yapılar, Enerji Sönümleme, Katmanlı İmalat

Öz

Havacılık, otomotiv ve biyomedikal gibi endüstrilerde, hafif ve yüksek performanslı enerji sönümleyici malzemelere duyulan talep giderek artmaktadır. Katmanlı imalat teknolojileri ile üretilen fonksiyonel gradyanlı kafes yapılar (FGKY) bu ihtiyaca yenilikçi bir çözüm olarak öne çıkmaktadır. Malzeme özelliklerinin (yoğunluk, topoloji, hücre boyutu vb.) yapı içinde kademeli olarak değiştirilmesine dayanan fonksiyonel gradyan konsepti, mekanik tepkinin ve enerji sönümlenmesinin optimize edilmesine olanak tanımaktadır. Bu çalışma, FGKY'lerin enerji sönümleme kapasitesi üzerine yapılmış güncel deneysel ve sayısal çalışmaları sistematik olarak incelemektedir. Makale, temel tasarım stratejilerini, birim hücre topolojilerini, gradyan türlerini, üretim yöntemlerini ve malzemeleri, ölçülebilir performans metriklerini ve bu yapıların endüstriyel uygulama potansiyellerini ele almaktadır. Ayrıca, mevcut teknolojik zorluklar ve gelecekteki araştırma yönelimleri de değerlendirilerek alandaki araştırmacılar için kapsamlı bir yol haritası sunulmaktadır.

A Systematic Review of Energy Absorption in Functionally Graded Lattice Structures

Article Info

Research article
Received: 06/02/2026
Revision: 25/05/2026
Accepted: 06/06/2026

Keywords

Functionally Graded Lattice Structures, Energy Absorption, Additive Manufacturing

Abstract

In industries such as aerospace, automotive, and biomedical engineering, there is a growing demand for lightweight materials with high energy absorption performance. Functionally graded lattice structures (FGLSs) manufactured through additive manufacturing technologies have emerged as an innovative solution to meet this need. The functional grading concept, which involves the gradual variation of material properties within the structure such as density, topology, and cell size enables effective tailoring of the mechanical response and optimization of energy absorption behavior. This study provides a systematic review of recent experimental and numerical research focused on the energy absorption capacity of FGLSs. The paper examines fundamental design strategies, unit cell topologies, types of gradients, manufacturing methods and materials, quantifiable performance metrics, and the potential industrial applications of these structures. In addition, current technological challenges and future research directions are discussed, offering a comprehensive roadmap for researchers in this field.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Havacılık, otomotiv ve biyomedikal gibi yüksek mühendislik disiplinlerinde, hafiflik ile yüksek enerji sönümleme verimliliğini birleştiren yenilikçi malzeme sistemlerine duyulan ihtiyaç her geçen gün artmaktadır. Bu ihtiyacı karşılamak amacıyla geleneksel dolgu malzemelerinin yerini, katmanlı imalat teknolojileri sayesinde üretilebilen karmaşık kafes yapılar almıştır. Kafes yapılar, birim kütle başına sundukları yüksek enerji sönümleme kapasitesi, geniş tasarım serbestliği ve mekanik özelliklerin bölgeye göre özelleştirilebilmesi gibi avantajlarla ön plana çıkmaktadır. Özellikle havacılık sektöründe enerji verimliliğini artırma ve yapısal ağırlığı optimize etme noktasında stratejik bir potansiyel sunmaktadır [1].

Geleneksel üniform kafes yapılar, yük altında genellikle ani kayma bantları (shear band) oluşturarak yıkıcı hasar sergileyebilirken,

*Corresponding author, e-mail: ilkay.gunel@gazi.edu.tr
DOI: 10.29109/gujsc. 1883221

FGKY'ler, malzemenin (yoğunluk, topoloji veya hücre boyutu) yapı boyunca stratejik olarak dağıtılmasıyla bu sorunu aşabilmektedirler. Literatürde yer alan çalışmalar, fonksiyonel gradyan stratejisinin, üniform muadillere kıyasla özgül enerji sönümleme (specific energy absorption-SEA) kapasitesi değerlerinde %173,9 gibi oldukça yüksek artışlar sağlayabildiğini ve tepe ezilme kuvvetini %74,9 oranında yükseltebildiğini kanıtlamıştır [2]. Özellikle, darbe noktasından uzaklaştıkça yoğunluğu artan gradyanlı tasarımların en iyi çarpışma dayanımını sergilediği saptanmıştır [2].

Kafes yapıların mekanik yanıtı, birim hücre topolojisi ve Maxwell stabilite kriteri ile doğrudan ilişkilidir. Düğüm noktası bağlantı derecesine (Z) bağlı olarak yapılar; bükülme baskın (bending-dominated) veya çekme baskın (stretch-dominated) olarak sınıflandırılmaktadır. Kare oryantasyonlu hücreler, dikey çubukların katmanlar halinde ardışık burkulması ile deforme olurken, elmas (diamond) tipi hücreler plastik mafsal oluşumu sayesinde daha kararlı ve düz bir plato bölgesi sunmaktadır. Ayrıca, negatif Poisson oranı (negative Poisson ratio) sergileyen ökzetik yapılar, darbe anında malzemeyi yüklü bölgeye doğru toplayarak yerel rijitliği artırmaktadır. Böylece geleneksel yapılara kıyasla darbe anında daha kararlı bir deformasyon ve yüksek enerji sönümleme kapasitesi sunabilmektedir [3].

Son dönemde yapılan önemli bir araştırma, doğrusal gradyanların ötesine geçerek periyodik dalga fonksiyonlarına (sinüs/kosinüs) dayalı yoğunluk değişimlerinin, üniform yapılara göre %148,1 daha fazla enerji sönümlediğini ortaya koymuştur [4]. Benzer şekilde, tek bir yapı içerisinde farklı topolojilerin birleştirildiği topoloji bazlı gradyan stratejilerinin, enerji sönümleme kapasitesini belirlemede sadece çubuk çapı değişiminden daha baskın bir rol oynadığı belirtilmiştir. Ayrıca kafes yapıların viskoelastik malzemelerle kaplanması veya boşluklarının doldurulması, yapının hem yerel rijitliğini korumuş hem de enerji dağıtma mekanizmalarını önemli ölçüde iyileştirmiştir [5].

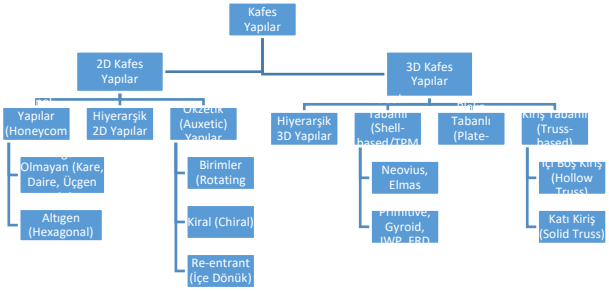
2. FONKSİYONEL GRADYANLI KAFES YAPILAR VE ENERJİ SÖNÜMLEME (FUNCTIONALLY GRADED LATTICE STRUCTURES AND ENERGY ABSORPTION)

Kafes yapılar (lattice structures), temel birimlerin (hücrelerin) belirli bir formda periyodik olarak bir araya gelmesiyle oluşan periyodik gözenekli yapılardır ve doğada geniş bir ölçekte bulunmaktadır. NaCl'nin mikroyapısı, yüzey merkezli kübik (FCC) özelliklerine sahip bir kafes yapıdır (Şekil 1) [6]. Birçok metal yapı ise hacim merkezli kübik (BCC) özellikleri gösteren kafes yapılardır. Bu yapılar, gözenekli ve çok hücreli yapıların önemli bir üyesi olup, özellikle birim kütle başına sundukları yüksek enerji sönümleme kapasitesi ve hafiflikleri nedeniyle mühendislik uygulamalarında yaygın olarak tercih edilmektedir.



Şekil 1. Doğadaki kafes yapılar; (a) NaCl kristal yapısı [6]; (b) Hayvan kemiği mikroyapısı [7]; (c) Bitki gövdesinin mikroyapısı [8]; (d) Balpeteği [9] (Figure 1. Lattice structures in nature: (a) NaCl crystal structure [6]; (b) Animal bone microstructure [7]; (c) Plant stem microstructure [8]; (d) Honeycomb [9])

Kafes yapılar, yapısal konfigürasyon özelliklerine göre temel olarak iki boyutlu (2D) ve üç boyutlu (3D) kafes yapılar olmak üzere iki ana kategoriye ayrılmaktadır. Bu sınıflandırma, yapıların enerji sönümleme kapasitelerini ve mühendislik uygulamalarındaki davranışlarını belirleyen temel bir çerçeve sunmaktadır (Şekil 2).



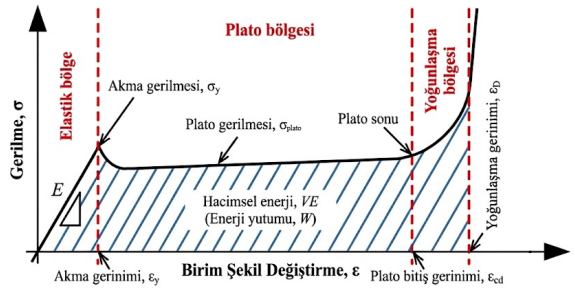
Şekil 1. Kafes yapıların sınıflandırılması (Figure 2. Classification of lattice structures)

Kafes yapıların ve kafes yapıların kullanıldığı enerji sönümleme çalışmalarında belirtilen terimlerin açıklanması, ilgili çalışmaların anlaşılması için önem arz etmektedir. Şekil 3, bir kafes yapının basma yükü altındaki tipik gerilme-birim şekil değiştirme (stress-strain) eğrisini göstermektedir. Bu eğri, kafes yapıların mekanik davranışlarını ve enerji sönümleme kapasitelerini analiz etmek için temel teşkil etmektedir. Eğri üzerinde elastik bölge, plato bölgesi ve yoğunlaşma bölgesi (densification region) olmak üzere üç temel bölge bulunmaktadır. Elastik bölge, kafes yapıların yük altındaki geri dönebilir deformasyon aşamasını gösteren bölgedir. Elastik modülü (E), malzemenin sertliğini veya elastikliğini gösteren katsayıdır. Akma gerilmesinin, akma birim şekil değiştirmesine oranıyla ($E=\sigma_y/\varepsilon_y$) hesaplanmaktadır. Poisson oranı (μ) ise bir eksende çekilen veya basılan

malzemenin, buna dik olan diğer eksenlerdeki genişleme veya daralma oranını ifade etmektedir.

Plato bölgesi, akma noktasından sonra başlayan ve yapının plastik deformasyona uğradığı asıl enerji sönümleme aşamasıdır. Bu bölgedeki ortalama gerilme değeri plato gerilmesi olarak adlandırılmaktadır. Enerjinin büyük bir kısmı bu sabit veya az değişken gerilme seviyesinde sönümlenmektedir.

Yoğunlaşma bölgesi, kafes hücrelerinin tamamen çöktüğü ve hücre duvarlarının birbirine temas etmeye başladığı son aşamadır. Bu noktada gerilme hızla yükselmektedir. Bu durumun başladığı nokta yoğunlaşma birim şekil değiştirmesi (ε_D) olarak tanımlanmaktadır.



Şekil 2. Basma yükü altındaki kafes yapıların tipik gerilme-birim şekil değiştirme grafiği (Figure 3. Typical stress–strain curve of lattice structures under compressive loading)

Enerji sönümleme (W), eğrinin altında kalan alan olup yapının toplam enerji sönümleme kapasitesini veya birim hacim başına sönümlenen enerjiyi (volumetric energy, VEA) temsil etmektedir. Bu terimlere ek olarak literatürde, enerji sönümleme ile ilgili çalışmalarda temel metrikleri oluşturan bağıl yoğunluk, gözeneklilik, SEA, tepe ezilme kuvveti ve ezilme yükü verimliliği gibi kavramlar da yer almaktadır. Bağıl yoğunluk (relative density-ρ^*), kafes yapının yoğunluğunun, yapıldığı katı malzemenin yoğunluğuna oranıdır ($\rho^*=\rho/\rho_s$). Bu değer aynı zamanda katı malzemenin hacminin (V) toplam hacme oranıdır (v_s/V). Gözeneklilik (Porosity- ϕ), yapı içerisindeki boşluk oranını ifade etmekte olup $1-v_s/V$ formülü ile hesaplanmaktadır. Birim hücre boyutu (a) ve uzunluk (L), kafes yapıyı oluşturan en küçük periyodik birimin boyutlarını ve yapının toplam uzunluğunu ifade etmektedir. Gerilme (σ) ve birim şekil değiştirme (ε), ezilme kuvvetinin (F) kesit alanına (S) bölünmesiyle nominal gerilme, yer değiştirmenin (δ) toplam uzunluğa (L) bölünmesiyle nominal birim şekil değiştirme elde edilmektedir. SEA, birim kütle başına sönümlenen toplam enerji miktarını ifade etmektedir (W/m). Hafiflik ve yüksek performans aranan mühendislik uygulamaları için en kritik göstergelerden biridir. Tepe ezilme kuvveti (F_{peak}), yapının basma yükü altında ulaştığı ilk maksimum kuvvet değeridir. Özellikle düşük tepe kuvveti ve yüksek sönümleme kapasitesi birçok durumda istenilen bir özelliktir. Ezilme yükü verimliliği (Crushing load efficiency) ise ortalama ezilme kuvvetinin tepe ezilme kuvvetine oranıdır.

3. DARBE ENERJİSİ SÖNÜMLEME PARAMETRELERİ (IMPACT ENERGY ABSORPTION PARAMETERS)

Darbe enerjisi, hareket halindeki bir kütlenin başka bir cisimle çarpışması sonucunda çok kısa bir zaman diliminde yapıya aktarılan kinetik enerji olarak ifade edilmektedir. Kafes yapılar, periyodik gözenekli formları sayesinde birim kütle başına sundukları yüksek enerji sönümleme kapasiteleri ile mühendislik uygulamalarında kritik rol oynamaktadır. Matematiksel olarak, darbe anındaki toplam enerji kütlenin hızı (v) ve kütlesi (m) ile tanımlanan kinetik enerjidir.

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2 \quad (1)$$

Enerji sönümü, malzemenin deformasyon süreci boyunca yuttuğu toplam enerji miktarını temsil etmektedir. Gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi altındaki alan olarak hesaplanmaktadır.

$$W = \int_0^{\varepsilon} \sigma(\varepsilon)d\varepsilon \quad (2)$$

Ortalama gerilme (σ_{avg}), basma işleminin başlangıcından yoğunlaşma aşamasına kadar olan bölgedeki ortalama gerilme olarak tanımlanmaktadır.

$$\sigma_{avg} = \frac{1}{\varepsilon_d}\int_0^{\varepsilon_d} \sigma(\varepsilon)d\varepsilon \quad (3)$$

Plato gerilmesi, (σ_{plato}), akma noktasından (ε_y) yoğunlaşma noktasına (ε_d) kadar olan, plastik deformasyonun gerçekleştiği ana bölgedeki ortalama gerilme olarak ifade edilmektedir.

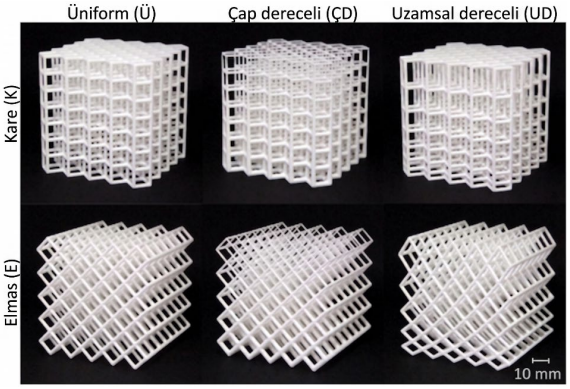
$$\sigma_{plato} = \frac{1}{\varepsilon_d-\varepsilon_y}\int_{\varepsilon_y}^{\varepsilon_d} \sigma(\varepsilon)d\varepsilon \quad (4)$$

Enerji sönümleme verimliliği (η), yapının enerjiyi ideal bir sönümleyiciye kıyasla ne kadar (sabit gerilme altında) sönümlediğini ölçen bir verimlilik katsayısıdır.

$$\eta = \frac{1}{\sigma_{peak}\,\varepsilon_d}\int_0^{\varepsilon_d} \sigma(\varepsilon)d\varepsilon \quad (5)$$

Burada σ_{peak} tepe ezilme gerilmesidir. Plato gerilmesi, enerji sönümleme verimliliği ve tepe ezilme kuvvetleri gibi metrikler, araştırmalarda yer alarak özellikle SEA değerlerinin kıyaslanmasında kullanılmaktadır. Nian ve ark.nın araştırmaları bu çalışmalardan bir tanesi olup yanal darbe yüklemesi

altında eksenel ve radyal yönde derecelendirilmiş FGKY'lerin enerji sönümleme karakteristiklerini incelemişlerdir [2]. Geleneksel homojen dolgulu yapılar yerine stereolitografi (SLA) yöntemiyle BCC gradyanlı yapılar, UTR8119 reçine kullanılarak üretilmiş ve ince duvarlı alüminyum boruların içine yerleştirilerek üç noktalı eğme testlerine tabi tutulmuştur. FGKY'lerin kullanılması, üniform dolgulu muadillerine kıyasla SEA değerinde %173,9'luk bir artış, tepe ezilme kuvvetinin değerinde ise %74,9'luk bir yükselme sağlandığı ortaya koyulmuştur. Ayrıca, darbe noktasından uzaklaştıkça artan gradyanlı yapıların kullanılmasının en iyi çarpışma dayanımını sergilediği tespit edilmiştir. Çalışmada mekanik davranışı analiz etmek için Gibson-Ashby modelinin katman bazlı fonksiyonel gradyanı tanımlayacak şekilde genişletilmiş bir versiyonu (analitik model) ve Abaqus ortamında doğrusal olmayan açık dinamik (explicit dynamic) sonlu elemanlar analizi kullanılmıştır. Gradyan üssü (m), duvar kalınlığı (t) ve akma gerilmesi (σ_y) gibi değişkenlerin SEA ve tepe ezilme kuvveti üzerindeki doğrusal olmayan etkilerini tahmin etmek için Kriging modelleri kullanılmıştır [2]. Daynes ve ark. ise SLA ve BCC gradyanlı FGKY yerine PA12 malzemesi kullanılarak seçici lazer sinterleme (SLS) yöntemiyle üretilen altı farklı kafes konfigürasyonunu ele almışlardır [10]. Basit kübik (simple cubic, SC) birim hücre geometrisi üzerinden (Şekil 4), hücre boyutu, çubuk (strut) çapı ve hücre yöneliminin mekanik davranış üzerindeki etkileri deneysel, analitik ve sayısal yöntemlerle incelenmiştir. Çalışma sonucuna göre kare FGKY'lerin, dikey çubukların ardışık katmanlar halinde burkulmasıyla hasar aldığı ve gerilme-gerinim eğrisinde karakteristik dalgalı profillerin oluşmasına yol açtığı görülmüştür. Elmas FGKY'lerin ise burkulma sergilemediği, bunun yerine çubuk eklemlerine yakın bölgelerde plastik mafsalların oluşmasıyla, daha kararlı ve düz bir plato bölgesi sunduğu ortaya koyulmuştur. Tüm gradyanlı yapılar yoğunlaşma noktasına ulaşıldığında, üniform yapılardan daha üstün performans sergilemiştir [10].



Şekil 3. Üniform, doğrusal gradyanlı ve periodik gradyanlı numuneler [10] (Figure 4. Uniform, linear graded, and periodic graded samples [10])

4. YÜKLEME KOŞULLARI VE GELİŞTİRİLEN KAFES TOPOLOJİLERİ (LOADING CONDITIONS AND DEVELOPED LATTICE TOPOLOGIES)

Fonksiyonel gradyanlı kafes yapıların enerji sönümleme performansının belirlenmesi doğrultusundaki çalışmalar, numunelerin görece yavaş hızlardaki mekanik tepkilerini ortaya koyan yarı-statik [11-27] ve zamana bağlı dinamik yükleme rejimleri [28-35] ile sönümleme mekanizmalarına etki eden topolojik tasarımlar [36-51] olmak üzere iki ana eksende yoğunlaşmaktadır. Günümüze kadar gelen çalışmalar incelendiğinde ökzetik geometriler [36-40], gerilme yığılmalarını minimize eden matematiksel tabanlı TPMS (triply periodic minimal surfaces) mimariler [41-42] ve farklı malzemelerin avantajlarını bir araya getiren hibrit/IPC (interpenetrating phase composite) yapılar [43-51] ön plana çıkmaktadır. Bu sistematik inceleme kapsamında, söz konusu beş temel kategorinin enerji sönümleme kapasitesi üzerindeki etkileri, deformasyon modları ve kararlılık kriterleri açısından birbirleriyle ilişkilendirilerek ele alınmıştır. Bal peteği, hiyerarşik, kiriş tabanlı kafes yapılara ait çalışmalar ayrı bir başlık altında toplanmamış, yükleme rejimleri altında bahsedilmiştir. Zira bu tür geleneksel kafes yapıların ilk kez ele alındığı tarihten bugüne kadar çeşitli mekanik yüklere olan davranışları incelenmiştir. Özellikle ökzetik, TPMS ve hibrit/IPC yapılar son zamanlarda giderek artan bir seviyede çalışmalara konu olan yenilikçi kafes yapılardır.

4.1 Yarı-statik yük altındaki kafes yapıların davranışları (Quasi-static behavior of lattice structures)

Fonksiyonel gradyanlı hücresel malzemelerin yarı-statik basma yükleri altındaki mekanik yanıtı ve deformasyon mekanizmaları, yapıların enerji sönümleme verimliliklerini belirleyen en temel araştırma alanıdır [11, 21, 31, 33]. Geleneksel

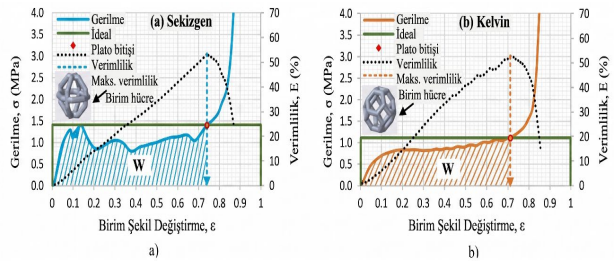
homojen kafes tasarımlarında sıklıkla karşılaşılan yerel kararsızlıklar ve bükülme kaynaklı ani gerilme düşüşleri, fonksiyonel yoğunluk veya geometri gradyanları sayesinde yerini daha kararlı, pürüzsüz ve genişletilmiş bir plato bölgesine bırakmaktadır [10, 16, 26, 38]. Katmanlı imalat teknolojileriyle üretilen bu gradyanlı mimarilerde, malzemenin basma altındaki katmanlı çökme modu kontrol altına alınarak hem akma dayanımı hem de birim hacim başına düşen sönümleme kapasitesi optimize edilmektedir [12, 14, 15].

Kiriş tabanlı 3D kafes yapıların teorik mekanik sınırları erken dönem çalışmalarda Wallach ve Gibson [11] tarafından formüle edilmiştir. Araştırmacılar, periyodik bir kafes yapısının mekanik davranışını hem deneysel hem de teorik olarak incelemişlerdir. Çalışmada, özellikle sandviç panellerde çekirdek malzemesi olarak kullanılma potansiyeli yüksek olan tam üçgenleştirilmiş kafes geometrilerinin elastik modülleri ile tek eksenli basma ve kayma mukavemetleri analiz edilmiştir. Çalışma, birim hücrenin boy/en oranının dokuz bağımsız elastik sabit ve mukavemet değerleri üzerindeki etkisini formüle etmiştir. Yapı çekme baskın olduğu için, efektif elastik modülünün ve kayma modülünün, bağıl yoğunluk ile doğrusal bir ilişki sergilediği gösterilmiştir. Boy/en oranındaki değişiminin, yapının anizotropik karakterini doğrudan etkilediği bildirilmiştir. Araştırmacılar, sonlu boyuttaki numunelerin mukavemet ve rijitliğinin sonsuz bir diziden daha yüksek olduğunu saptamışlardır. Yükleme yönüne bağlı olarak farklı başarısızlık modlarının gözlemlendiği de belirtilmiştir [11]. Li ve ark., homojen yapının aksine elektron ışın ergitme (EBM) yöntemiyle üretilen fonksiyonel gradyanlı Ti-6Al-4V kafes yapıların basma davranışı, elastik modülü ve deformasyon mekanizmaları üzerine araştırma yapmışlardır [12]. Temel birim hücre olarak rombik dodekaedron geometrisi seçilmiş ve radyal yönde çift yoğunluklu bir gradyan stratejisi uygulanmıştır. EBM yöntemiyle üretilen numunelerde yaklaşık 0,5 mm kalınlığında çubuk yapıları elde edilmiştir. Çalışmanın en özgün bulgularından biri, yüksek mukavemetli fakat gevrek karakterdeki kübik hücreler ile düşük mukavemetli fakat sünek karakterdeki modifiye rombik dodekaedron hücrelerinin hibrit bir gradyan içinde birleştirilmesidir. Bu yaklaşım sayesinde, her iki geometrinin zayıf yönleri ortadan kaldırılmış, yüksek mukavemet ve yüksek süneklik kombinasyonuna sahip hibrit yapılar elde edilmiştir [12].

Ullah ve ark., Li ve ark.nın çalışmasından farklı olarak deformasyon sırasındaki yerel hasar mekanizmalarına yönelik çalışmalar gerçekleştirmiştir [13]. Kiriş tabanlı kafes yapılarda SLM teknolojisi kullanılarak Ti-6Al-4V alaşımından üretilen kagome, BCC, F2CC (FCC) ve F2BCC (FCC ve BCC birleşimi) konfigürasyonlarının tek eksenli basma ve kayma yükleri altındaki mekanik performanslarını ve enerji sönümleme kapasitelerini incelemişlerdir [13]. Çalışmada üç eksenli gerilme durumuna duyarlı sünek hasar modeli geliştirilmiş ve doğrulanmıştır. Bu modele göre, hasar başlangıç geriniminin, üç eksenli gerilme parametresine (hidrostatik gerilmenin eşdeğer von Mises gerilmesine oranı) (η) bağlı olduğu varsayılmaktadır. $-1/3<\eta\leq 0$ aralığında kesme hasarı rejimi (shear failure), $0<\eta\leq\eta_T$ aralığında karma mod rejimi (mixed mode), $\eta_T<\eta$ değerlerinde ise sünek hasar rejiminin (ductile failure) başladığı belirtilmiştir. Çalışmada ele alınan tüm numuneler 11,5 mm sabit yükseklikte üretilmiştir. Kafes yapısındaki çubukların eğilmesi sırasında kopmanın, yüksek üç eksenli gerilme seviyeleri nedeniyle çekme tarafında başladığı saptanmıştır. Ayrıca kagome yapısının diğer çekme baskın yapılardan daha üstün olduğu kanıtlanmıştır. Kagome yapısının, aynı yoğunluktaki diğer kafes yapılara kıyasla özgül mukavemet ve enerji sönümleme açısından %60 ile %100 arasında daha yüksek performans sergilediği belirtilmiştir. Bu durum, kagome kollarının tüm yapılar arasında en kısa burkulma boyuna sahip olmasıyla açıklanmıştır [13]. Choy ve ark., farklı bir üretim tekniği (SLM) ve birim hücre geometrisi (kübik (C) ve bal peteği (H)) ile Ti-6Al-4V alaşımından üretilen FGKY'lerin yarı-statik basma özelliklerini incelemişlerdir [14]. Çubuk çapının hücre katmanları boyunca doğrusal ve sürekli olarak değiştirildiği bir gradyan tasarımı sunulmuştur. C ve H olarak iki farklı birim hücre ve her tip için iki farklı yönelim (C1, C2 ve H1, H2) ele alınmıştır. Gradyanlı numunelerde çubuk çapları katmanlar boyunca 0,4 mm'den 1,2 mm'ye kadar sürekli olarak değiştirilirken, karşılaştırma amacıyla aynı ortalama %20 bağıl yoğunluğa sahip üniform numuneler üretilmiştir. Üniform yapıların yüksek bağıl yoğunlukları nedeniyle tipik bir katı metal davranışı sergilediği veya v-şekilli kayma bantları ile ani ve rastgele bir kırılma gösterdiği, bu nedenle ilk tepe gerilmesinden sonra yük taşıma kapasitesinde %54 ile %64 arasında büyük bir düşüşe yol açtığı belirlenmiştir. FGKY'lerin ise üniform muadillerine kıyasla daha yüksek plato gerilmesi performansı gösterdiği belirtilmiştir. Özellikle C2 tasarımında plato gerilmesi %67 oranında artış göstermiştir. C1 ve H1 gibi dikey destekli tasarımların, dikey desteği olmayanlara göre daha yüksek taşıma kapasitesi sunduğu saptanmıştır [14].

Metal malzemelerden farklı olarak, Habib ve ark. tarafından yürütülen araştırmada özdeş bağıl yoğunlukta (%15) fakat farklı birim hücre topolojilerine sahip altı farklı polimerik kafes yapının yarı-statik enerji sönümleme davranışları incelenmiştir [15]. PA12 malzemesi ile malzeme püskürtme (MJ) teknolojisi kullanılarak dairesel (circular), sekizgen (octagonal), güçlendirilmiş sekizgen (strengthened octagonal), kelvin (tetrakaidecahedron), rhombicuboctahedron (RO) ve kübik hücre topolojileri kullanılmıştır**.** Eğilme, gerilme ve burkulma baskın yapılardan birer yapı incelenmiştir. Sekizgen kafes yapı, ideal enerji sönümleyiciye en yakın performansı sergileyerek optimum tasarım olarak tanımlanmıştır. Bu yapı 1,05 MPa ile en yüksek plato gerilmesini ve birim hacim başına en yüksek enerji sönümlemesini gerçekleştirmiştir. Eğilme baskın yapıların (dairesel, sekizgen, kelvin) düşük rijitliğe ve mukavemete sahip olmalarına rağmen, kararlı bir plato bölgesi sayesinde yüksek enerji sönümleme verimliliği sundukları saptanmıştır. Buna karşılık, gerilme ve burkulma baskın yapılar (RO ve kübik) daha sert ve güçlü olsalar da akma noktasından sonra sergiledikleri ani yumuşama nedeniyle düşük enerji sönümleme performansı gösterdikleri belirtilmiştir [15]. Çalışmada verimlilik parametresi (E), yapının belirli bir ε gerinimine kadar sönümlediği enerjinin, aynı σ_{peak} değerini üreten ideal bir yapının sönümlediği enerjiye oranı olarak tanımlanmıştır (Şekil 5) (Denklem 6).

$$E = \frac{1}{\sigma_{peak}\,1}\int_0^{\varepsilon}\sigma(\varepsilon)d\varepsilon \qquad (6)$$

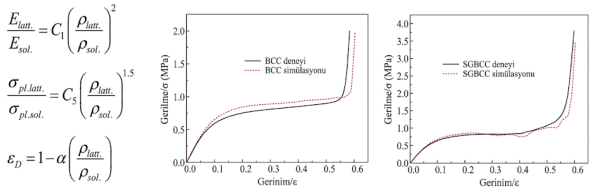


Şekil 4. a) Sekizgen ve b) Kelvin kafes yapıları için, plato bölgesinin sonunda elde edilen enerji verimlilik parametresinin karşılaştırılması [15]
(Figure 5. Comparison of energy efficiency parameters at the end of the plateau region for (a) octagonal and (b) Kelvin lattice structures [15])

Çalışmada araştırmacılar kafes yapıların ezilme mekanizmasının son derece karmaşık bir süreç olduğu ve üç tür doğrusal olmayanlığı birden içerdiğini belirtmişlerdir. Bu nedenle ezilme mekanizmasının kapalı (implicit) çözücülerle simüle edilemediği belirtilmiştir. Kafes yapıların ezilmesi sırasında söz konusu olan üç doğrusal olmayanlık; hücre çubuklarındaki yerel gerilmenin ana malzemenin doğrusal elastik sınırını aşması ve plastik deformasyona girmesiyle ortaya çıkan malzeme doğrusal olmayanlığı, yapıların büyük şekil değiştirmelerinden kaynaklanan geometrik doğrusal olmayanlığı ve ezilme sırasında çubukların birbirleriyle etkileşime girmesi sonucu oluşan temas doğrusal olmayanlığı şeklinde sıralanmıştır [15]. Kafes yapıların özellikle hasar gelişimi sırasındaki davranışının sonlu elemanlar yöntemi (SEY) ile belirlenmesi ile ilgili olarak Bai ve ark., SLS teknolojisiyle PA12 tozundan üretilmiş üniform ve gradyanlı BCC yapıların enerji sönümleme kapasitelerini araştırmıştır [16]. Çalışmada, çubuk çapının kademeli değiştirildiği ve çubuk sabit tutulup hücre yüksekliğinin değiştirildiği farklı gradyana sahip BCC yapıların enerji sönümleme kapasiteleri incelenmiştir. Araştırmanın önemli sonuçlarından birisi, kümülatif enerji sönümleme ile gerinim arasındaki matematiksel ilişki olup, bu ilişki üniform yapılarda doğrusal, gradyanlı yapılarda ise üstel bir güç yasası (power law) şeklinde elde edilmiştir (Tablo 1). Oluşturulan sonlu elemanlar modelinde Johnson-Cook plastisite ve hasar modelleri kullanılmış ve bu modellerin kafes yapıların hasar gelişimini ve plato bölgelerindeki dalgalanmaları (Şekil 6) başarılı bir şekilde tahmin ettiği vurgulanmıştır [16].

Tablo 1. Kafes yapıların Gibson-Ashby katsayıları [16] (Table 1. Gibson–Ashby coefficients of lattice structures [16])

Katsayılar	Klasik katsayı aralığı	BCC	SGBCC
C_1	0.1 ~ 4.0	0.215	0.251
C_5	0.25 ~ 0.35	0.225	0.194
α	1.4 ~ 2.0	2.56	2.39



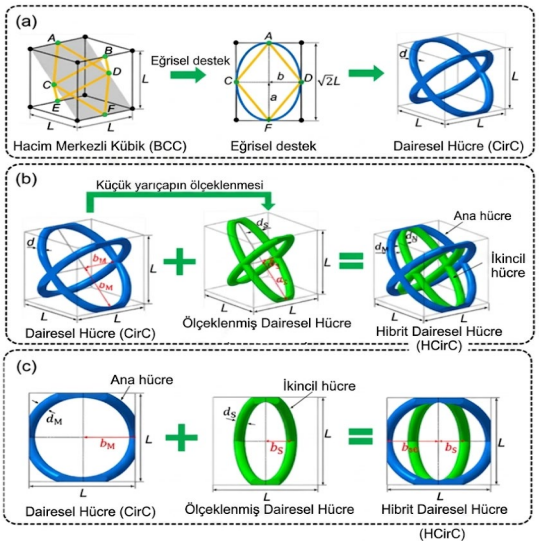
Şekil 5. Enerji sönümleme ile gerinim arasındaki matematiksel ilişki ve deneysel sonuçlar ile analiz sonuçlarının gerilme-gerinim doğrultusundaki uyumu [16] (Figure 6. Mathematical relationship between energy absorption and strain, and the agreement between experimental and numerical results in the stress–strain response [16])

Tek eksenli yüklemeler yerine burulma yükleri altındaki bir milin, yüzeyinde ve orta bölgesinde oluşan yüksek kayma gerilmelerini karşılayacak şekilde yerleştirilmiş FGKY'ler ile ilgili bir çalışma Hailu ve ark. tarafından ortaya koyulmuştur [17]. Bu çalışmada elmas ve dikey-eğimli (vertical-inclined) birim hücreler üniform ve dairesel bir

dizilimle yerleştirilmiştir. PA12 tozu ile MJ teknolojisi kullanılarak, malzeme kalınlığının her iki uçtan merkeze doğru (eksenel) ve merkezden dış yüzeye doğru (radyal) arttığı FGKY'ler üretilmiştir. Burulma sertliği ve enerji sönümleme kapasitesinin, kayma gerilmesi konsantrasyonuyla (dış yüzey ve mil ortası) uyumlu bir malzeme dağılımı sayesinde önemli ölçüde iyileştirildiği kanıtlanmıştır. Gradyanlı yapıların, üniform muadillerine göre daha yüksek sertlik ve mukavemet sunduğu fakat bu artışın daha gevrek bir kırılma moduyla sonuçlandığı gözlemlenmiştir. Ayrıca dairesel desenleme yönteminin, yapının dayanabileceği burulma açısını artırdığı fakat burulma sertliği ve nihai kayma mukavemetini arttırmada birincil bir etkisi olmadığı saptanmıştır. Hem radyal hem de boyuna yönde fonksiyonel malzeme dağılımına sahip elmas yapısının, üniform yapıyı burulma sertliği ve nihai mukavemet açısından geride bıraktığı bildirilmiştir [17].

FGKY'lerde bağıl yoğunluk gradyanının enerji sönümleme kararlılığına olan etkisi Rodrigo ve ark. tarafından ele alınmıştır. MJ eklemeli imalat teknolojisi kullanılarak üretilen PA11 malzeme ile BCC kafes yapıların yarı-statik ezilme davranışları incelenmiştir [18]. Çalışmada, benzer bağıl yoğunluğa (~0,168) sahip üç farklı konfigürasyon karşılaştırılmıştır. Bunlar, üniform yapı (çubuk çapı 1,66mm), tek yönlü gradyan (UDFG) yapı (çubuk çaplarının yükleme yönü boyunca yoğunluğu her katmanda %35 artıracak şekilde) ve çift yönlü gradyan (BDFG, çubuk çaplarının yapının merkezindeki ince değerden dış yüzeylere doğru simetrik olarak arttığı) yapıdır. Deneysel veriler, bağıl yoğunluk sabit tutulduğunda, BDFG konfigürasyonunun diğer tüm yapılardan daha üstün mekanik özellikler sunduğunu kanıtlamıştır. BDFG yapısının, birim hacim başına en yüksek enerji sönümleme kapasitesine (421 kJ/m^3) ve en yüksek SEA değerine (2,40 kJ/kg) ulaştığı belirtilmiştir. BDFG yapı, 0,79 MPa ile en yüksek plato gerilmesi değerini sergileyerek üniform ve UDFG tasarımları geride bırakmıştır [18].

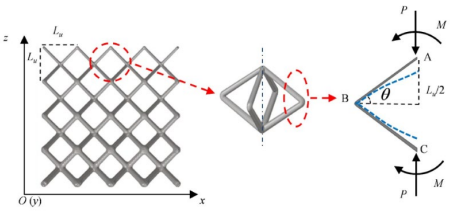
Geleneksel çubuk çaplarının değiştirilmesi ile elde edilen gradyanlıkların aksine, geometrik hiyerarşiyi dairesel hücre yapılarıyla birleştirmek isteyen Wang ve ark., yüksek özgül mekanik özelliklere ve SEA değerine sahip yenilikçi bir dairesel hücreli (HCirC) kafes konfigürasyonunu sunmuşlardır [19] (Şekil 7). Geleneksel kafes yapılarında düz kolların (çubukların) kesiştiği noktalarda oluşan keskin eklemlerin, deformasyon sırasında ciddi gerilme yığılmalarına yol açarak yapısal performansı düşürmesi sorununa çözüm üretmek, çalışmanın temel amacı olmuştur [19].



Şekil 6. Dairesel-hücreli kafes yapısı için temel tasarım geometrileri a) BCC ve CirC b) HCircC c) HCirC ön görünüş [19] (Figure 7. Fundamental design geometries of circular-cell lattice structures: (a) BCC and CirC, (b) HCircC, (c) front view of HCirC [19])

Yaygın olarak kullanılan BCC kafes yapısını temel alarak, düz kolların yerine eliptik kavisli kolların kullanıldığı dairesel hücre (CirC) ve içine ölçeklendirilmiş bir ikincil hücrenin yerleştirilmesiyle elde edilen iç içe geçmiş dairesele benzer birim hücre (HCirC) araştırmacılarca önerilmiştir. Yapısal özelliklerin incelenebilmesi için ikincil hücrenin ana hücreye oranını belirleyen yarıçap ölçekleme faktörü (m) ve kol çapı oranı (k) olmak üzere iki temel geometrik parametre tanımlanmıştır. Dijital ışık işleme tabanlı yazıcı teknolojisi kullanılarak, mekanik dayanımı yüksek akrilat foto-kürlemeli reçine (hard-tough resin) ile numuneler üretilmiştir. HCirC yapısının hem dairesel tabanlı yapısı hem de hiyerarşik düzeni sayesinde, geleneksel BCC ve basit dairesel (CirC) yapılardan çok daha üstün bir performans sergilediği saptanmıştır. Geleneksel BCC kafes yapısı ile kıyaslandığında, HCirC yapısının özgül rijitliğinde %342,4'e, özgül akma mukavemetinde ise %13'e varan bir artış kaydedilmiştir. SEA değerinde %126,6'ya, çarpışma yükü verimliliğinde ise %18'e varan iyileşmeler gözlemlendiği belirtilmiştir [19].

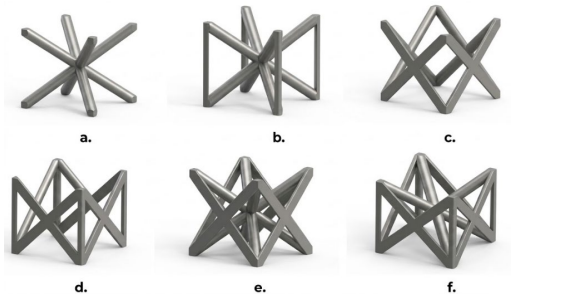
Tek yönlü yoğunluk gradyanı yerine farklı yoğunluk gradyanına sahip kafes yapıların yarı-statik yükler altındaki davranışı Gao ve ark. tarafından BCC birim hücre temelli iki farklı gradyana sahip yapılar ile ele alınmıştır [20]. SLM yöntemiyle AlSi10Mg alaşımından üretilen tek yönlü gradyanlı kafes (UGL, Şekil 8) ve çift yönlü gradyanlı kafes (BGL) yapılarının yük taşıma ve enerji sönümleme kapasiteleri deneysel, sayısal ve teorik olarak incelenmiştir [20].



Şekil 7. UGL yapısı ve içerisinde yer alan birim hücre geometrisi [20] (Figure 8. UGL structure and its unit cell geometry [20])

Kafes yapıyı oluşturan kollar üzerindeki eksenel kuvvetlerin neden olduğu uzama veya kısalma enerjisi ile kollar üzerindeki teğetsel kuvvetler ve eğilme momentlerinin neden olduğu enerji değişimi, ilgili fonksiyonların kol uzunluğu boyunca entegrasyonu ile hesaplanmıştır. Tekil bir mikro-birimin (pseudo unit cell/PUC) eşdeğer modülü hesaplandıktan sonra, tüm gradyanlı yapının sertliğini belirlemek amacıyla kompozit mekaniğinde kullanılan Reuss Modeli benimsenmiştir. Bu model, yapıyı oluşturan her bir katmanın hacimsel oranlarını ve her katmanın PUC modülünü dikkate alarak toplam eşdeğer modülü hesaplamaktadır. Gradyanlı yapının nihai basma mukavemeti, Ushijima ve Smith'in üniform yapılar için geliştirdiği modelin [21] gradyanlı sistemlere uyarlanmasıyla hesaplanmaktadır. Bu yaklaşımda, mukavemetin temel olarak yapının en yumuşak veya en zayıf katmanının bağıl yoğunluğu tarafından domine edildiği varsayılmıştır. Yapının enerji sönümleme kapasitesinin sona erdiği yoğunlaşma gerinimi, enerji sönümleme verimliliği (η) yöntemiyle teorik olarak tayin edilmiştir. Bu yöntemde, verimlilik eğrisinin maksimuma ulaştığı nokta yoğunlaşma sınırı olarak kabul edilmiştir. Deneysel ve sayısal bulgular, gradyanlı tasarımların yük aktarım yollarını modifiye ederek üstün özellikler sunduğunu göstermiştir. UGL yapısının başlangıç rijitliğinin BGL yapısından daha yüksek olduğu ve her iki yapının da benzer bağıl yoğunluğa (%12,70) sahip olmasına rağmen, UGL yapısının enerji sönümleme kapasitesinin BGL'den daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Özellikle 0,4 ile 0,7 gerinim aralığında UGL'nin avantajı daha belirgin hale geldiği belirtilmiştir [20].

İlerleyen çalışmalarda kiriş tabanlı kafes yapıların dikey destek (z-takviyesi) etkileri ve narinlik oranları sırasıyla Li ve ark. [22] ile Coluccia ve ark. [23] tarafından incelenerek optimizasyon kriterleri belirlenmiştir. Li ve ark., lazer toz yatağı füzyonu (LTYF) yöntemiyle üretilen Ti-6Al-4V alaşımı esaslı kafes yapıların mekanik davranışlarını ve hasar mekanizmalarını incelemişlerdir. Araştırmada beş farklı birim hücre geometrisi seçilmiştir. Bu kafes yapılar FCCZ, BCCZ, FBCCZ, elmas ve RD yapılarıdır. FBCCZ yapısı, incelenen beş topoloji arasında en yüksek elastik modül ve en yüksek basma mukavemetine sahip konfigürasyon olarak öne çıkmıştır. FCCZ yapısı ise mukavemet değerinde FBCCZ'nin gerisinde kalsa da özgül basma mukavemeti ve SEA kapasitesi bakımından en yüksek performansı sergilemiştir. Elmas kafes yapı ile kıyaslandığında FCCZ'nin özgül basma mukavemeti %131, SEA değeri ise %116 daha yüksek çıkmıştır. VEA miktarında FBCCZ elmas yapıdan %239 daha yüksek, SEA değerinde hafiflik avantajı nedeniyle FCCZ, FBCCZ'den %13,4 daha verimli bulunmuştur. BCCZ, FCCZ ve FBCCZ yapıları çekme baskın davranış sergileyerek gerilme-gerinim eğrisinde dalgalanmalar göstermiş, RD yapısı eğilme baskın karakteriyle daha düz ve kararlı bir plato bölgesi sunmuştur [22]. Coluccia ve ark. tarafından yapılan çalışmada ise, kafes yapıların enerji sönümleme kapasiteleri, dikme yönelimi, dikey takviyeler, hücre kombinasyonları ve en-boy oranı (AR) gibi geometrik ve topolojik parametreler üzerinden kapsamlı bir şekilde incelenmiştir [23]. Bu çalışma özellikle dikey yönlü çubukların eklenmesi ile elde edilen kafes yapıların, yarı-statik yükleme altındaki mekanik davranışlarını sayısal ortamda görmek adına diğer çalışmalardan farklılaşmaktadır. Çalışmada, enerji sönümleme uygulamalarındaki kiriş tabanlı kafes yapılar temel alınmış, farklı olarak BCC, FCC ve bunların birleşimi olan FBCC ile aynı yapıların ana yükleme yönünde (z-ekseni) dikey dikmelerle takviye edilmiş türevleri BCCZ, FCCZ ve FBCCZ de incelenmiştir (Şekil 9).



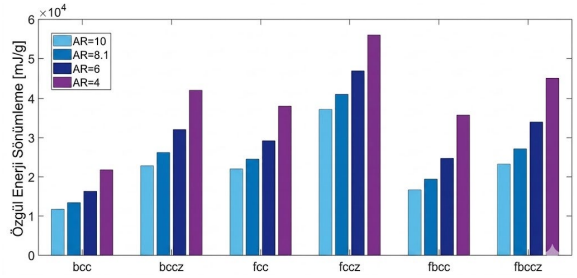
Şekil 8. a) BCC, b) BCCZ, c) FCC, d) FCCZ, e) FBCC, f) FBCCZ kafes yapılar [23] (Figure 9. Lattice structures: (a) BCC, (b) BCCZ, (c) FCC, (d) FCCZ, (e) FBCC, (f) FBCCZ [23])

Birim hücrelere ait kirişlerin, referans düzlem (yer düzlemi) ile yaptıkları kiriş yönelim açıları Tablo 2'de verilmiştir. Yer düzlemine dik olacak şekilde tasarlanan bu destek yapılar (Z), BCC, FCC ve FBCC birim hücrelerine eklenerek BCCZ, FCCZ ve FBCCZ birim hücreleri oluşturulmuştur.

Tablo 2. Kafes yapılara ait kiriş yönelim açıları ve dikey destek durumu (Table 2. Beam orientation angles and vertical support conditions of lattice structures)

Kafes Yapı Türü	Hücresel Mimari (Topoloji)	Kiriş Yönelim Açısı	Dikey (Z) Destek
BCC	Köşelerden merkeze uzanan kirişler	35°26'	Yok
BCCZ	Dikey destekli BCC	35°26' ve 90°	Var
FCC	Köşelerden yüzey merkezlerine uzanan kirişler	45°	Yok
FCCZ	Dikey destekli FCC	45° ve 90°	Var
FBCC	BCC ve FCC'nin birleşimi	35°26' ve 45°	Yok
FBCCZ	Dikey destekli yüzey ve BCC	35°26', 45° ve 90°	Var

Çalışmada doğrusal olmayan statik ve dinamik hesaplamalı modeller kullanılmıştır. Statik analizler, malzemenin VEA ve SEA kapasitelerini incelemek için kurgulanırken, dinamik hesaplamalar yapının yoğunlaşma noktasını belirlemek ve çarpışma yükü verimliliğini değerlendirmek için kullanılmıştır. Çalışmada farklı en-boy oranlarına (AR = 4, 6, 8,1 ve 10) sahip yapılar karşılaştırılmıştır (Şekil 10). Bulgular, AR ve uygulanan topolojik modifikasyonların (özellikle yük doğrultusundaki Z takviyelerinin) mekanik özellikler üzerinde önemli etkilere sahip olduğunu göstermiştir. Dikey takviyeler ve hücre kombinasyonları, yapının darbe anındaki gerilme dağılımını ve enerji sönümleme karakteristiğini doğrudan etkilemiştir [23].

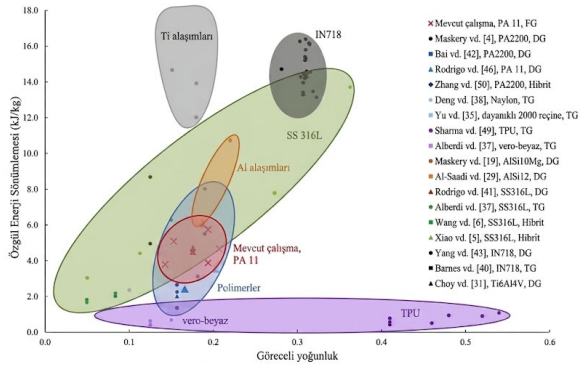


Şekil 9. Statik analizlerden elde edilen, 0,3 birim şekil değiştirme değerindeki SEA verileri [23] (Figure 10. SEA values obtained from static analyses at a strain value of 0.3 [23])

Yarı-statik analiz sonuçlarına göre kirişlerin nispeten ince olduğu AR=10 konfigürasyonunda BCC yapısının SEA değeri 34014 mJ/g iken, yapıya dikey takviye eklendiğinde elde edilen BCCZ konfigürasyonunda bu değerin 72759 mJ/g seviyesine çıktığı görülmüştür. Bu durum, Z-takviyesinin SEA verimliliğini, yüksek AR oranlarında iki katından fazla artırdığını göstermektedir. BCCZ yapısının SEA değeri AR'nin 10'dan 4'e düşürülmesiyle 72759 mJ/g'den 89919 mJ/g'ye yükselmiştir. Fakat FCCZ yapısında SEA değeri AR=8,1'de 76439 mJ/g seviyesine ulaşmışken, kirişler kalınlaştırılıp AR=6'ya inildiğinde SEA değeri 67299 mJ/g'ye gerilemiştir. Bu sonuç, topolojilere özgü geometrik eşik değerlerinin olduğu şeklinde ifade edilmiştir. İncelenen tüm senaryolar içinde en yüksek SEA kapasitesine, AR=4 kombinasyonuyla ulaşılmıştır. AR=4 kombinasyonu içerisinde ise FBCCZ yapısının 109163 mJ/g SEA değerine ulaşarak en yüksek değere sahip olduğu görülmüştür. Ancak yapısal hafifliğin ön planda olduğu AR=8,1 gibi durumlarda, yük altında daha geç yoğunlaşma evresine giren BCCZ yapısının 78972 mJ/g SEA değeriyle, FBCCZ'nin (74354 mJ/g) önüne geçtiği belirtilmiştir [23].

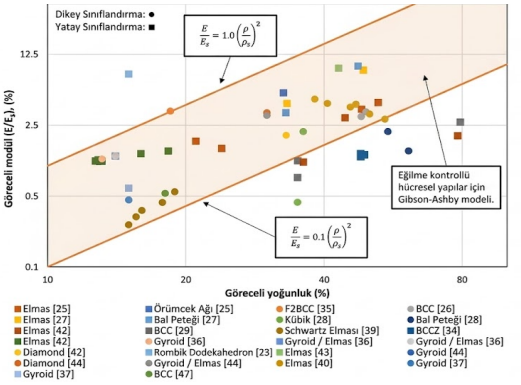
Sayısal ortamda Coluccia ve ark. tarafından elde edilen çalışmalardan farklı olarak Rodrigo ve ark., kiriş tabanlı kafes yapıların yarı-statik basma yükleri altındaki SEA değerlerini deneysel olarak incelemişlerdir [24]. PA11 malzemesinden ve MJ teknolojisiyle numuneler üretilmiştir. Tek bir yapı içerisinde üç farklı birim hücre topolojisini (BCC, Rhombic Dodecahedron -RD ve Octet-OT) birleştirerek hem topoloji bazlı hem de çubuk çapı bazlı gradyan etkisi de ayrıca incelenmiştir. Araştırmada, birim hücrelerin düğüm noktalarındaki uyumlulukları göz önünde bulundurularak bükülme baskın (BCC ve RD) ve çekme baskın (OT) hücreler seçilmiştir. Fonksiyonel derecelendirme için üç ana yöntem uygulanmıştır. Bunlar, çubuk çapının sabit tutulup sadece topolojinin değiştirildiği yapı (UDL), hücre tiplerinin değiştiği fakat bağıl yoğunluğun korunması için çubuk çapının uyarlandığı yapı (URL) ve hem topolojinin hem de çubuk çapının birlikte değiştirildiği yapılardır. Deneysel sonuçlar, topoloji gradyanının, deformasyon modellerini, gerilme-gerinim eğrilerini ve enerji sönümleme kapasitesini belirlemede çubuk çapı gradyanına göre daha baskın bir rol oynadığını göstermiştir. FGKY tasarımında, merkezden dışa doğru (bi-directional) ve tek yöne doğru (uni-directional) olacak şekilde iki farklı dizilimde testler gerçekleştirilmiştir. Dışa doğru yapıların, üniform ve tek yöne doğru yapılara göre daha yüksek plato gerilmesi ve enerji sönümü sunduğu saptanmıştır. Ayrıca dışa doğru yapılar, çökme esnasında çekme baskın katmanlarının etkisiyle iki belirgin verimlilik tepe noktası sergilerken, tek yöne doğru yapılar tek

bir tepe noktası sergilemiştir. Araştırmacılar, Gibson-Ashby modelini modifiye ederek, farklı birim hücre tiplerinden oluşan FGKY'lerin plato gerilmesini ve yoğunlaşma gerinimini tahmin edebilen yarı-ampirik formül geliştirmişlerdir. Bu formül, her bir hücre tipinin toplam plato gerilmesine katkısını bileşen katman bazında hesaplayarak literatüre teorik bir katkı sağlamaktadır. Şekil 11, literatürde rapor edilen diğer FGKY'ler ile mevcut çalışmayı SEA açısından karşılaştıran bir Ashby diyagramıdır. Diyagram, incelenen PA11 FGKY'lerin, benzer bağıl yoğunluğa sahip polimer malzemelerden üretilmiş FGKY'lerin büyük çoğunluğuna kıyasla daha yüksek enerji sönümleme kapasitesine sahip olduğunu ortaya koymuştur [24]. Noronha ve ark., gerçekleştirdikleri çalışmada ise FGKY'lerin özellikle bükülme baskın topolojilerde mükemmel enerji sönümleme sunduğunu doğrulamış fakat FCCZ ve FCCXYZ gibi çekme baskın birim hücrelerin gradyanlı kullanımının yapısal rijitliği artırabileceğini de savunmuşlardır [25]. Gerçekleştirdikleri çalışmada eklemeli imalat ile üretilen FGKY'ler üzerine odaklanarak bu yapıların tasarım stratejilerini, mekanik yanıtlarını, deformasyon davranışlarını ve uygulama alanlarını sistematik bir analiz çerçevesinde değerlendirmişlerdir.



Şekil 10. Farklı kafes yapıların SEA değerlerine ait karşılaştırma [24] (Figure 11. Comparison of SEA values for different lattice structures [24])

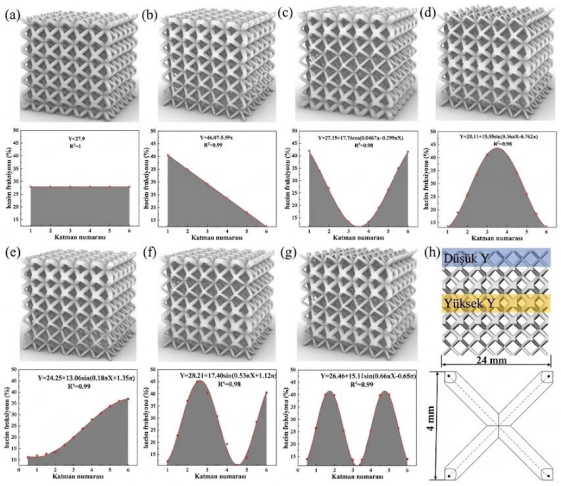
Çalışmada, FGKY'lerin akma dayanımı verilerin Gibson-Ashby modelinin üst ve alt sınırlarına iyi uyum sağladığı belirtilmiş olup, üniform yapılara kıyasla belirgin bir güç kaybı yaşanmadan, tasarlanan yapılarda optimum kütle dağılımının elde edilebileceği gösterilmiştir. Buna rağmen FGKY'lerin rijitlik (elastik modül) performansının önemli derecede düşük olduğu ve verilerin Gibson-Ashby modeline zayıf uyum sağladığı gözlemlenmiştir (Şekil 12). Araştırmacılar, bu durumun FGKY'lerin homojen olmayan yapısından kaynaklandığını ve bu yapılar için yeni analitik tahmin modellerine ihtiyaç duyulduğunu belirtmişlerdir [25]. Eklemeli imalattan kaynaklanan yüzey pürüzlülüğü ve toz yapışması gibi kusurların özellikle kalın çubuklu bölgelerde yorulma performansını olumsuz etkileyebileceğine dikkat çekilmiştir. Ayrıca yaptıkları araştırmalar doğrultusunda literatürde yer alan çalışmaların büyük bir kısmının Maxwell kriterine göre eğilme baskın olduğu belirtmişlerdir [25].



Şekil 11. FGKY'lere ait bağıl elastik modüller [25] (Figure 12. Relative elastic moduli of FGKYs [25])

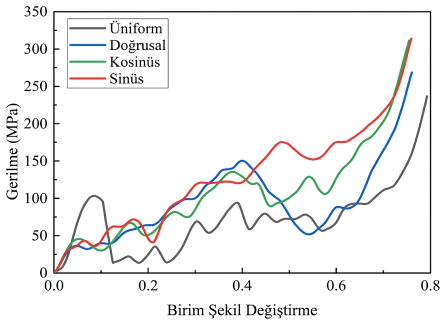
Birden fazla yoğunluk gradyan değişimini inceleyen Lin ve ark., Ti-6Al-4V alaşımından SLM yöntemiyle BCC birim hücre yapısı temelli yükleme doğrultusuna dik yönde, logaritmik (LF) gradyanlı, doğrusal (linear) gradyanlı, üstel (index) gradyanlı, basamak (stair) gradyanlı ve önce artan sonra azalan (UTD) gradyanlı olmak üzere beş farklı kafes yapının mekanik davranışlarını ve enerji sönümleme kapasitelerini incelemişlerdir [26]. Aynı bağıl yoğunluğa sahip olacak şekilde üretilen yapılar karşılaştırıldığında, yükleme doğrultusuna dik yoğunluk gradyanına sahip tüm yapıların, homojen (uniform) yapıya göre daha üstün mekanik özellik sergilediği belirlenmiştir. Logaritmik (LF) gradyanlı yapı ise homojen yapıya göre %28,99 daha yüksek bir elastik modül sergilerken, doğrusal gradyanlı yapının akma dayanımı homojen yapıdan %16,77 daha yüksek çıkmıştır. Enerji sönümleme performansında üstel ve doğrusal gradyanlı yapıların en verimli sonuçları verdiği tespit edilmiştir. Üstel yapısının VEA kapasitesinin, homojen yapıya göre %38,38, doğrusal yapısının ise %48,29 oranında daha yüksek olduğu saptanmıştır. Bu artışın, gradyanlı yapıların kademeli çökme mekanizması sayesinde deformasyonun daha geniş bir gerinim aralığına yayılmasından kaynaklandığı belirtilmiştir. Deneysel ve sayısal sonuçlar arasındaki küçük sapmaların SLM üretiminden kaynaklı mikroskobik kusurlar ve kalıntı gerilmelerle ilişkili olduğu vurgulanmıştır [26]. Birden fazla yoğunluk gradyan stratejisini inceleyen bir diğer araştırma olan Zhu ve ark. tarafından yürütülen çalışmada, seçici lazer ergitme (SLM) yöntemiyle üretilen ve periyodik

yoğunluk gradyanlarına sahip Ti-6Al-4V alaşımlı kafes yapıların mekanik performansı ve enerji sönümleme karakteristikleri incelenmiştir [4]. Çalışmanın temel amacı, yoğunluk dağılımının Lin ve ark.nın gerçekleştirmiş olduğu çalışmadan farklı olarak sinüs ve kosinüs dalga fonksiyonlarına göre periyodik tasarlanmasıdır. Ayrıca geleneksel üniform ve doğrusal gradyanlı yapılara kıyasla daha kontrollü bir mekanik yanıt elde etmek amaçlanmıştır. Araştırmada temel birim hücre olarak, basitliği ve üretilebilirliği nedeniyle BCC topolojisi tercih edilmiştir. Numuneler, Ti-6Al-4V metal tozu kullanılarak SLM teknolojisi ile üretilmiştir. SLM üretim sürecindeki lazer enerji dağılımı özellikleri nedeniyle, çubuk yüzeylerine ve bağlantı noktalarına yapışan ergimemiş metal tozlarının gerçek bağıl yoğunluğunu daha yüksek (%3,33'e kadar) hale getirdiği gösterilmiştir [4]. Çalışmada periyodik fonksiyon parametresi T'nin etkisi, Sin-0,5T, Sin-1T, Sin-1,5T ve Sin-2T gibi farklı konfigürasyonlar üzerinden analiz edilmiştir (Şekil 13). Buradaki T, bağıl yoğunluk dağılımını belirleyen sinüs fonksiyonunun periyot parametresini ifade etmektedir. T'nin önündeki sayısal değer ise kafes yapısı boyunca dalganın kaç tur attığını göstermektedir [4]. T periyoduna sahip sinüs fonksiyonuyla tanımlanmış bir denklem kullanılarak yükseklik boyunca çubuk çapı değiştirilmekte ve farklı yoğunluklara sahip bölgeler elde edilmektedir. Sin-0,5T, en kısa periyoda sahip yarım sinüs dalgası formundaki tasarımdır. Yapı içerisinde daha az sayıda düşük yoğunluklu bölge barındırmaktadır. Sin-1T, tam bir sinüs dalgası periyoduna sahip konfigürasyondur. Sin-1,5T, bir buçuk periyotluk, yapısal olarak asimetrik bir yoğunluk dağılımı sunan tasarımdır. Sin-2T ise iki tam periyoda sahip tasarımdır. T parametresi arttığı için yapı içerisinde birbirini izleyen yüksek ve düşük yoğunluklu bölgelerin sayısı en fazla bu modelde yer almaktadır. T periyot parametresinin artırılıp azaltılması, kafes yapısı içindeki düşük yoğunluklu ve yüksek yoğunluklu bölgelerin dağılımını doğrudan kontrol etmektedir. Araştırmacılar bu periyotları değiştirerek düşük yoğunluklu bölgelerin yerleşimini, baskı altındayken yapının nereden kırılmaya başlayacağını ve hasarın nasıl ilerleyeceğini belirlemeye çalışmışlardır. Kısa periyotlarda (T=0,5) hasar katman katman ilerlerken, uzun periyotlarda (T=2) dağınık zayıf bölgeler nedeniyle yapı birden fazla noktadan aynı anda çökmeye başlamaktadır [4].



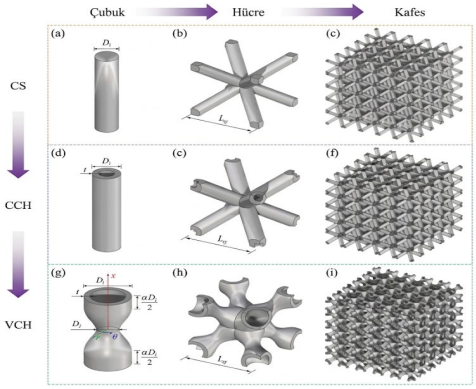
Şekil 12. Farklı bağıl yoğunluk dağılımlarına sahip kafes yapılar: a) Üniform, b) Doğrusal, c) Kosinüs, d) Sinüs (Sin-1T), e) Sin-0,5T, f) Sin-1,5T ve g) Sin-2T; h) Sin-1T [4] (Figure 13. Lattice structures with different relative density distributions: (a) uniform, (b) linear, (c) cosine, (d) sine (Sin-1T), (e) Sin-0.5T, (f) Sin-1.5T, (g) Sin-2T; (h) Sin-1T [4])

Aynı bağıl yoğunluğa sahip yapılar arasında, periyodik gradyanlı Sin-1T tasarımı en yüksek enerji sönümleme kapasitesini sergilemiştir. Bu tasarımın SEA kapasitesi yoğunlaşma gerinimi öncesi, üniform yapıdan %148,10, doğrusal gradyanlı yapıdan %77,63 ve kosinüs tipi gradyanlı yapıdan %66,34 daha fazla bulunmuştur. T değeri arttıkça düşük yoğunluklu bölgelerin yayılımı nedeniyle erken kırılmaların meydana geldiği ve enerji sönümleme kapasitesinin azaldığı gözlemlenmiştir. Üniform kafes yapılar, tüm yapı boyunca uzanan ani makaslama hasarları sergilerken, gradyanlı yapılar düşük yoğunluklu bölgelerden başlayan öngörülebilir bir katman katman çökme davranışı göstermiştir. Plato bölgesi, gerilme değerlerinin gerinimle birlikte sürekli dalgalandığı ancak genel toplamda yükselen bir eğilim sergilediği bir formda gerçekleşmiştir (Şekil 14). Bu tip dalgalanmaların temel nedeninin, yapıdaki kısmi kırılmalarla oluşan kayma düzlemlerinin (slip planes) ardından yapının sürekli olarak kendini yeniden hizalaması ve sıkışmaya devam etmesi olarak açıklanmıştır [4].



Şekil 13. Farklı kafes yapıların gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri [4] (Figure 14. Stress–strain curves of different lattice structures [4])

İçi boş duvarlı kafes yapıların, geleneksel dolu çubuklu yapılara kıyasla yarı-statik yükler altındaki davranışları Zhang ve ark. tarafından ele alınmıştır [27]. Geleneksel dolu kafes yapılara alternatif olarak, enerji sönümleme kapasitesini maksimize etmek amacıyla içi boş duvarlı ve değişken kesitli kafes yapıların mekanik performanslarını incelemişlerdir. TWIP çeliği kullanılarak SLM yöntemiyle üretilen BCC kafes yapıların enerji sönümleme verimliliği deneysel ve sayısal yöntemlerle optimize edilmiştir. Klasik dolu kesitli BCC çubuk yapısı (CS), kalınlığın sabit tutulduğu içi boş yapı (CCH) ve çubuk boyunca çapın değişim gösterip merkezde daraldığı yapı (VCH) olacak şekilde üç farklı kafes yapısı ele alınmıştır [27] (Şekil 15).



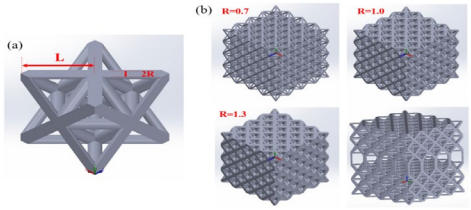
Şekil 14. Birim hücrelere ait görseller [27] (Figure 15. Unit cell geometries [27])

Araştırma sonuçlarına göre CCH yapısı, dolu (CS) yapıya kıyasla plato gerilmesinde %56,7 ve SEA kapasitesinde %29,2'lik bir artış sağlamıştır. VCH yapısı ise CS yapıya göre SEA değerini %135,6 oranında artırarak önemli bir performans sergilemiştir. Aynı bağıl yoğunluk altında, CCH yapıları için maksimum SEA değerine 13,3476'lık dış çap/kalınlık oranında ulaşılmıştır. VCH yapıları için en yüksek enerji sönümleme verimliliği, minimum/maksimum çap oranının 0,6, boyun verme yerel katsayısının 0,4 ve çap/kalınlık oranının 10 olduğu konfigürasyonda elde edilmiştir. Araştırmada VCH tasarım stratejisinin sadece BCC topolojisi ile sınırlı olmadığı, FCC, elmas ve rombik dodekaedron (RD) gibi diğer bükülme baskın kafes yapılara uygulandığında da enerji sönümleme performanslarının sırasıyla %46,3, %81,5 ve %215,2 oranında artırdığını kanıtlamışlardır [27].

4.2 Dinamik yük altındaki kafes yapıların davranışları (Dynamic behavior of lattice structures under compressive/impact loading)

Kafes yapıların dinamik ve darbe yükleri altındaki mekanik yanıtı, atalet etkileri, dalga yayılımı ve yüksek şekil değiştirme hızları nedeniyle yarı-statik yüklemelere kıyasla çok daha karmaşık deformasyon modları sergilemektedir [28, 32]. Literatürdeki çalışmalar, yapıların dinamik yükler altında kararlı çökme mekanizmalarını korumasını, malzeme ataletinden yararlanarak sönümleme kapasitesinin artırılmasını ve bu davranışların farklı topolojiler ile hiyerarşik kombinasyonlar üzerinden optimize edilmesini hedeflemektedir [29, 30, 34]

Dinamik yükleme rejimlerinin kafes yapılar üzerindeki etkisini anlamak adına Ling ve ark. tarafından gerçekleştirilen çalışmada, SLA tekniği yöntemiyle üretilen ve çekme baskın bir yapısal yanıt sergileyen yüzey merkezli oktet kafes yapıların yarı-statik ve dinamik basma yükleri altındaki enerji sönümleme kapasiteleri araştırılmıştır [28]. Gevrek reçine (grey) ve sünek reçine (durable) olacak şekilde iki reçine kullanılmış, farklı bağıl yoğunluklara sahip (çubuk yarıçapları R = 0,7, 1,0 ve 1,3 mm) polimerik kafesler üretilmiştir (Şekil 16).

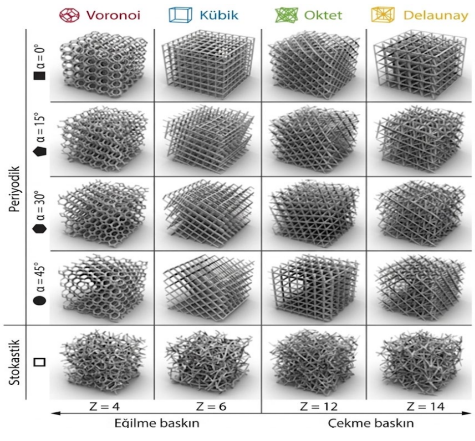


Şekil 15. Farklı bağıl yoğunluklara sahip üç yapı (çubuk yarıçapları sırasıyla R = 0,7, 1 ve 1,3 mm) [28] (Figure 16. Three structures with different relative densities (strut radii R = 0.7, 1, and 1.3 mm, respectively) [28])

Yarı-statik test sonuçlarına göre gevrek reçine ile üretilen yapılar, tüm bağıl yoğunluklarda gevrek bir davranış sergilemiş ve düşük gerinim seviyelerinde kırılmışlardır. Sünek reçine ile üretilen yapılarda ise düşük yoğunluklu (ρ=0,13) numunelerde hafif gerilme dalgalanmaları gözlemlenirken, yüksek yoğunluklu (ρ=0,41) numunelerde stabil bir plato bölgesi oluşmuştur. Dinamik testlerde (low-velocity impact) 6,5 kg'lık bir kütle, 3 m/s'lik bir başlangıç darbe hızıyla numunelere uygulanmıştır. Bir yük hücresi (load cell) aracılığıyla 30 ms'lik bir

sürede 3000 adet kuvvet veri noktası kaydedilmiştir. Ayrıca deformasyon sürecini yakalamak için 1800 fps (saniyedeki kare sayısı) hızında ve yüksek güçlü lambalar eşliğinde yüksek hızlı kamera kullanılmıştır. Çalışmanın en kritik bulguları, gerinim hızındaki artışın (yarı-statik testlere kıyasla) numunelerin akma gerilmesi ve deformasyon modu üzerindeki etkileridir. Sünek reçine ile üretilen kafeslerde belirgin bir gerinim hızı sertleşmesi (strain-rate hardening) gözlemlenmiştir. Dinamik yükler altındaki akma gerilmesi değerleri, yarı-statik yükleme sonuçlarından daha yüksek çıkmıştır. Bu sertleşme etkisi, çubuk yarıçapı arttıkça daha da belirgin hale gelmiştir. Gevrek reçine yapılarda ise beklentilerin aksine, gevrek reçineden üretilen kafeslerin akma dayanımı dinamik yükleme altında yarı-statik yüke göre düşüş göstermiştir (strain-rate softening). Yazarlar bu durumu, yüksek hızdaki darbe anında çubukların akma noktasına ulaşamadan yapıdan koparak ayrılmasına ve kırılmasına bağlamaktadır. Dinamik testlerde özellikle düşük yarıçaplı (R=0,7 mm) numunelerin, üretim kaynaklı büzülme kusurlarına daha duyarlı olduğu ve bu durumun darbe altındaki gerilme-gerinim eğrilerinde tekrarlanabilirliği azalttığı saptanmıştır [28].

Düzenli geometrik desenli çalışmaların aksine Mueller ve ark. tarafından gerçekleştirilen çalışmada, periyodik ve stokastik (rastgele) kafes yapıların yarı-statik ve dinamik enerji sönümleme özellikleri, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak, düğüm noktası bağlantı dereceleri (Z) 4 ile 14 arasında değişen dört farklı kafes topolojisi ile ele alınmıştır [29]. Bunlar Voronoi (Z = 4), kübik (Z = 6), oktet (Z = 12) ve delaunay (Z = 14) kafes yapılardır (Şekil 17).



Şekil 16. Bağlantı dereceleri, 4 (eğilme-baskın) ile 14 (çekme-baskın) arasında değişen birim hücrelere sahip dört farklı kafes tipi [29] (Figure 17. Four different lattice types with unit cells having connectivity degrees ranging from 4 (bending-dominated) to 14 (stretching-dominated) [29])

Maxwell stabilite kriterine göre, bağlantı derecesi Z < 12 olan yapılar (voronoi ve kübik) bükülme baskın, Z > 12 olan yapılar (oktet ve delaunay) ise çekme baskın olarak sınıflandırılmıştır. Bu yapılar hem periyodik dizilimlerde farklı yükleme açılarında (0°, 15°, 30° ve 45°) hem de eşdeğer stokastik konfigürasyonlarda test edilmişlerdir. Ana malzeme olarak Al-6101 T6 alüminyum alaşımı seçilmiştir. Bu malzemenin gerinim hızı değişimlerine karşı duyarsız (strain-rate independent) olması, gözlemlenen tüm hız etkilerinin tamamen geometriden ve eylemsizlikten kaynaklandığını kanıtlamaya olanak tanımıştır. Analizler, 1 s^{-1} ile 10^4 s^{-1} arasında değişen geniş bir gerinim hızı aralığında gerçekleştirilmiştir. Kafes yapılar, biri sabit (alt) ve diğeri hareketli (üst) olan iki çelik plaka arasında basma yüküne tabi tutularak, taban plakasından elde edilen reaksiyon kuvvetleri üzerinden kafes yapıların mekanik yanıtları hesaplanmıştır. Üst plaka hızı (v(t)) ve numunenin başlangıç yüksekliği (L_o) ile $\dot{\varepsilon} = v(t)/L_0$ gerinim hızı hesaplanmıştır. Malzeme modeli olarak, %19 (0,19) üzeri geriniminde eleman silme özelliğine sahip doğrusal elasto-plastik bir model kullanılmıştır. Yüksek hızlardaki doğruluğu korumak için kütle ölçeklendirme (mass scaling) kullanılmamış, böylece gerçek dinamik etkiler korunmuştur. Voronoi yapılar, tüm periyodik FGKY'lerde diyagonal tabaka bazlı bir hasar sergilerken, stokastik versiyonda çubuk elemanların rastgele ve kademeli olarak çöktüğü belirlenmiştir. Bu yapılar, başlangıçtaki tepe gerilme noktası olmaksızın yüksek bir plato mukavemeti sunmuştur. Ayrıca kübik yapıların yönelim açısına en duyarlı yapı olduğu saptanmıştır. 0° açıda dikey çubukların ani çökmesiyle yüksek bir başlangıç tepe gerilmesi oluşurken, 45° açıda ve stokastik formda bükülme baskın bir hasar modu ile daha sabit bir plato gerilmesi gözlemlenmiştir. Böylece kübik yapı 0° yönelimde çekme baskın bir davranışla çok yüksek tepe kuvveti sergilerken, 45° yönelimde eğilme baskın bir moda geçmiştir. VEA ile tepe gerilmesi ilişkilendirildiğinde, kübik kafes yapısının yöneliminin tüm voronoi tabanlı yapıları geride bırakarak en yüksek verimliliği sunduğu saptanmıştır. Yarı-statik hızlarda elde edilen enerji sönümleme özelliklerinin düşük ve orta gerinim hızları (1...100 s^{-1}) için geçerliliğini koruduğu, yüksek hızlarda ise eylemsizlik etkileri devreye girerek yapıların mutlak performansında ciddi düşüşlere neden olduğu belirtilmiştir [29].

Tek başına kafes yapıların dinamik sınırlara ulaştığını savunan ve hibrit çözümlere yönelen Pizzorni ve ark., 3D baskılı bir kafes çekirdeği köpük dolgusu ile birleştirerek kompozit bir yapı oluşturmuş, böylece düşük hızlı darbe yükleri

altında hem ezilme kararlılığını artıran hem de katmanlar arası ayrılmayı önleyen çok disiplinli bir enerji sönümleme stratejisi önermiştir [30]. Çalışmada, termoplastik malzemenin ısıtılarak eritilmesi ve katman katman üst üste serilmesiyle üç boyutlu nesneler üretme yöntemi (FDM) kullanılarak, polimerik (ABS) kafes yapılar ile düşük yoğunluklu poliüretan köpüklerin kombinasyonundan (bi-malzeme yapısından) oluşan hibrit kompozit sistemlerin mekanik davranışını araştırmışlardır. Kübik (LS1), kare tabanlı piramidal (LS2) ve çapraz diyagonal piramidal (LS3) olacak şekilde üç farklı birim hücre geometrisi incelenirken birim hücrenin kenar uzunluğu, yani düğümden düğüme olan mesafenin (karakteristik uzunluğun) çubuk kalınlığına oranı (S) sabit tutulmuştur. Piramidal geometrinin (LS2) enerji sönümlemede en verimli yapı olduğu saptanmıştır. Optimize edilmiş ABS kafes yapısı, esnek bir poliüretan köpük matris içerisine gömülerek bi-malzeme yapısı oluşturulmuştur. Böylece saf kafes, saf köpük ve hibrit kompozit yapılar, yarı-statik basma ve düşük hızlı darbe testlerine tabi tutulmuştur. Hibrit kompozit yapının, basma altında saf piramidal kafes yapıya kıyasla SEA kapasitesinde %64,4'lük bir artış sağladığı tespit edilmiştir. Saf kafes yapıların basma altında düğüm noktalarındaki gerilme yığılmaları nedeniyle ani bir çökme sergilediği ve kırılan parçaların numune hacminin dışına fırladığı gözlemlenmiştir. Hibrit kompozit yapıda ise poliüretan köpük matrisin kafes iskeletini bir arada tuttuğu, kırılan çubukların hacim içinde kalarak yük taşımaya devam etmesini sağladığı ve bu sayede enerji sönümleme verimliliğini artırdığı kanıtlanmıştır. Düşük hızlı darbe testlerinde ise hibrit kompozit sistemin geri sıçrama katsayısının, saf kafes yapıya göre %52,2 oranında azaldığı saptanmıştır. Bu durumun, köpüğün yüksek viskoelastik özelliğinin çarpışma anındaki sönümleme etkisini önemli ölçüde iyileştirdiği ve darbe enerjisinin %16 daha fazla dağıtıldığı belirtilmiştir [30].

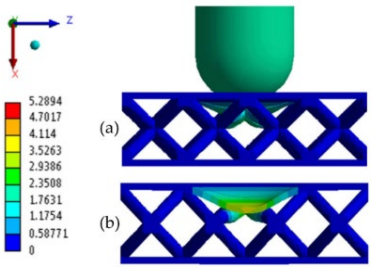
Yin ve ark., son yıllarda gözenekli yapılar içerisinde birim kütle başına sundukları yüksek enerji sönümleme kapasitesiyle öne çıkan kafes yapılar üzerine sistematik bir literatür incelemesi sunmuştur [31]. Çalışma, performans değerlendirme indekslerini, yükleme koşullarını, yapısal sınıflandırmaları, imalat yöntemlerini ve mühendislik uygulamalarını bir araya getirerek araştırmacılar için bir tasarım platformu oluşturmayı amaçlamıştır. Kafes yapıların enerji sönümleme performansını ölçmek için kullanılan temel plastik indeksler arasında, plato gerilmesi, ortalama çökme kuvveti, SEA, hacimsel enerji sönümleme ve çökme yükü verimliliği yer almaktadır. Tipik bir basma eğrisinin elastik bölge, plato bölgesi ve yoğunlaşma bölgesi olmak üzere üç aşamadan oluştuğu, ana enerji sönümleme sürecinin ise plastik deformasyonun gerçekleştiği plato bölgesinde yaşandığı vurgulanmıştır. Çalışmada kafes yapılar üzerinde test edilen yükleme formları, basma, çekme, üç noktalı eğilme, yerel basma, burulma, kayma ve kombine (kayma-basma, basma-burulma) yükler olarak özetlenmiştir. Kiral kiriş çekirdekli kanat profilleri, roket gövdelerinde titreşim sönümleyici sandviç yapılar ve uzay araçlarının iniş takımlarında yer alan enerji sönümleyici tamponlar potansiyel kullanım alanları olarak belirtilmiştir. Araştırma alanı olarak gradyan kafes yapıların (hücre topolojisi, hücre boyutu veya et kalınlığı gradyanı) enerji sönümleme üzerindeki etkilerinin derinleştirilmesi, karmaşık ve birleşik yükleme durumları altındaki performans analizleri, doğal mikroyapılardan esinlenen çok ölçekli bionik tasarımlar ve hücre seviyesinde topoloji optimizasyonu ile en yüksek enerji sönümleme verimliliğinin elde edilmesi üzerine önerilerde bulunmuşlardır [31].

Farklı yoğunluk gradyanına sahip kiriş tabanlı kafes yapıların sadece yarı-statik değil, aynı zamanda dinamik yükler altındaki enerji sönümleme performansları da Rodrigo ve ark. tarafından ele alınmıştır [32]. EBM yöntemiyle paslanmaz çelik (SS 316L) kullanılarak üretilen BCC kafes yapılar incelenmiştir. Çalışma, özellikle geleneksel üniform yapılara alternatif olarak önerilen tek yönlü yoğunluk gradyanının (DG1) ve çift yönlü yoğunluk gradyanının (DG2) mekanik performans üzerindeki etkilerine odaklanmıştır. DG1 kafes yapısında çubuk çapları yükleme yönünde (z-ekseni) monotonik olarak artarken, DG2 kafes yapısında çubuk çapları yapının merkezinden dış yüzeylere doğru simetrik olarak artacak şekilde kurgulanmıştır. Gradyanlı yapıların (DG1 ve DG2), en düşük yoğunluklu tabakadan başlayan ve daha yoğun tabakalara doğru ilerleyen tipik bir katmanlı çökme modu sergilediği belirtilmiştir. DG2 gradyanına sahip yapıların hem üniform hem de DG1 yapılarına kıyasla en yüksek plato gerilmesi ve enerji sönümleme kapasitesini sergilediği belirtilmiştir. 4 m/s hızındaki dinamik yüklemelerde, tüm yapıların plato gerilmelerinin yarı-statik duruma göre %12-20 oranında artış gösterdiği belirtilmiştir. Bu durum SS 316L ana malzemesinin gerinim hızı hassasiyetine bağlanmıştır. Yüksek hızlı darbe analizlerinde (25–100 m/s) doğrulanmış sonlu elemanlar modelleri üzerinden yürütülen parametrik çalışmalar, hız arttıkça çökme modunun değiştiğini ortaya koymuştur. Üniform yapılarda 50 m/s üzerindeki

hızlarda, şok dalgası yayılımı nedeniyle deformasyon üniform olmaktan çıkarak kademeli çökmeye evrilmiştir. DG2 yapılarında gradyan şiddetinin (tabakalar arası yoğunluk farkı) artırılması, 50 m/s hıza kadar enerji sönümlenmesini iyileştirirken, 100 m/s gibi çok yüksek hızlarda merkezdeki zayıf tabakaların erken çökmesi nedeniyle plato gerilmesinde düşüşe yol açtığı saptanmıştır. Çift yönlü gradyan tasarımının (DG2), yapının başlangıç basma mukavemetinden aşırı ödün vermeden enerji sönümleme kapasitesini maksimize etmek için etkili bir yöntem olduğu kanıtlanmıştır. Bu bulgular, özellikle havacılık ve savunma sanayiinde şok sönümleyici bileşenlerin tasarımında gradyan optimizasyonunun önemini vurgulamaktadır [32].

Chen ve ark. tarafından hazırlanan kapsamlı derlemede, fonksiyonel gradyanlı gözenekli yapıların mekanik analiz yöntemleri, performans karakteristikleri ve uygulama potansiyelleri ele alınmıştır [33]. Gözenekli yapıların temel olarak ana malzeme türlerine (metal, seramik, polimer, beton ve cam) veya geometrik özelliklerine (kafes, petek ve köpük yapılar) göre sınıflandırıldığı belirtilmiştir. Özellikle son yıllarda, karbon nanotüpler (CNT) ve grafen plakalar (GPL) gibi nano dolguların hücre duvarı matrisine eklenmesiyle, ağırlıkta kayda değer bir artış olmaksızın yapısal rijitliğin artırılmasına yönelik teorik araştırmalar yoğunlaşmıştır. Teorik hesaplamalarda gözenekli kiriş, plaka ve kabukların burkulma, eğilme ve titreşim tepkileri, Gibson-Ashby ve Menges-Knipschild gibi modeller kullanılarak analiz edilmiştir. Gözeneklilik değişimleri ise genellikle elastik modül, kayma modülü ve kütle yoğunluğunun kalınlık boyunca sürekli veya kademeli değişimini ifade eden matematiksel formüller aracılığıyla modellere dahil edilmiştir. Deneysel çalışmaların birçoğunun özellikle SLM tekniği ile gözenek boyutu, şekli ve duvar kalınlığının hassas gradyanlarla üretilerek çoğunlukla tek eksenli basma yükleri altında gerçekleştirildiği, akma dayanımı, plato gerilmesi ve enerji sönümleme kapasitesi gibi parametreler üzerinde yoğunlaştığı belirtilmiştir. Ayrıca makine öğrenmesi algoritmaları, hücresel morfolojilerin tanımlanmasında ve karmaşık kısmi türevli denklemlerin çözülmesinde geleneksel yöntemlere hız kazandıran bir alternatif olarak öne çıkmıştır. Teorik çalışmalarda bildirilen ve Tip I olarak adlandırılan (üst ve alt yüzeylerde küçük gözenekli/yüksek yoğunluklu, merkezde büyük gözenekli) dağılımın, özellikle kiriş ve plakalarda yapısal rijitliği ve burkulma direncini en üst düzeye çıkardığı gösterilmiştir. Enerji sönümleme açısından FGKY'lerin, homojen muadillerine göre %11 ile %89 arasında iyileşme sergilediği belirtilmiştir. Bu iyileşmenin temel nedeni, üniform yapılarda görülen kayma bandı hasarının yerine, gradyanlı yapılarda görülen ve enerjiyi daha geniş bir gerinim aralığına yayan katman katman çökme mekanizması olduğu belirtilmiştir. Gelecekte araştırmalarda, farklı gözeneklilik gradyanları ile ana malzeme türlerinin entegre edildiği, yapay zeka ile ilişki haritalarının keşfedildiği ve çok disiplinli (akışkan-yapı etkileşimi, termal dalgalar) çalışmalara odaklanması önerilmiştir [33].

Dinamik yükler altındaki kafes yapıların enerji sönümleme performansı ile ilgili gelenseksel metriklerin yerine Iacolino ve ark., PLA esaslı BCC kafes yapıların düşük hızdaki darbe tepkilerini ve enerji sönümleme kapasitelerini farklı bir metrik ile incelemiştir [34]. Çalışmada, EA, SEA veya ortalama ezilme kuvveti gibi geleneksel küresel metriklerin yakalayamadığı yerel deformasyon miktarını ölçmek için yeni bir yöntem önermişlerdir. Araştırmada, birim hücre boyutu 10 mm olan iki farklı BCC konfigürasyonu (Şekil 18) ele alınmıştır.



Şekil 17. BCC yapı üzerindeki yer değiştirme [34]
(Figure 18. Displacement distribution on the BCC structure [34])

Darbe anında ivme ölçerden alınan ivme-zaman (a-t) verileri, sayısal entegrasyon yöntemleri kullanılarak kuvvet-yer değiştirme (F-δ) eğrilerine dönüştürülüp, bu eğriler üzerindeki toplam küresel yer değiştirmeyi ifade eden δ_{max} değeri hesaplanmıştır. Bu değer, düşen vurucunun (impactor) numuneye temas ettiği andan itibaren ulaştığı en uç nokta olarak tanımlanmıştır. Darbe testinden sonra numunenin üst yüzeyinde meydana gelen kalıcı yerel plastik deformasyon (d_1 ve d_2) bir dijital derinlik kumpası (Mitutoyo 547-217S ABS Digital) kullanılarak manuel olarak ölçülmüştür. Bu ölçümlerin temel amacı, darbe noktasındaki yerel çökme miktarını saptamaktır. Araştırmacılar, δ_{max}/d (D^*) ifadesinin boyutsuz olduğunu belirtmişlerdir. Bu indeks sayesinde yerel plastik ezilme ile küresel yapısal yer değiştirme arasındaki ilişki tanımlanmıştır. Bu indeks ile benzer küresel yer değiştirmelere sahip iki numuneden, D* değeri yüksek olan için hasarın belirli bir bölgede aşırı

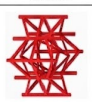
yoğunlaştığı ve yapısal bütünlüğün risk altında olduğu belirtilmiştir [34].

4.3 Ökzetik kafes yapılar (Auxetic lattice structures)

Geleneksel hücresel malzemelerin aksine, basma yükü altında eksenel olarak daralırken yanal doğrultuda içe doğru büzülen ökzetik yapılar, darbe bölgesinde yerel malzeme yoğunluğunu artırarak gerilme yığılmalarını önlemede önemli bir mekanik avantaj sunmaktadır [35, 37]. Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde, ilk dönemlerde daha ziyade çubuk tabanlı konvansiyonel re-entrant geometrilerin büyük şekil değiştirmeler altındaki sönümleme performansları incelenirken, güncel araştırmaların levha tabanlı yenilikçi tasarımlara, viskoelastik malzeme modellerine ve bilgisayar destekli fonksiyonel gradyan algoritmalarına kaydığı görülmektedir [36, 38, 39]. Bu topolojik değişim ve doğrusal olmayan gradyan stratejileri, ökzetik kafes yapıların düzlem içi (in-plane) ezilme kararlılığını artırmayı ve doğadan esinlenen gözenek mimarileriyle kütlesel sönümleme verimliliğini en üst seviyeye çıkarmayı hedeflemektedir [40].

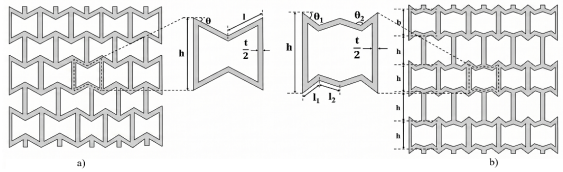
Ökzetik mekanizmaların büyük şekil değiştirmeler altındaki ezilme davranışlarını ve sönümleme performanslarını geniş bir çerçeveden ele alan Zhang ve ark., katmanlı imalatla üretilen ökzetik yapıların literatürdeki tarihsel gelişimini, geometrik sınırlarını ve mekanik potansiyellerini özetleyen kapsamlı bir derleme sunmuşlardır [35]. Çalışmada, re-entrant geometrilerin deformasyon mekanizmasının çubuk bükülmesine dayandığı, ok başı ve yıldız şekilli yapıların ise yüksek enerji sönümleme ve kararlı deformasyon modları sergilediği belirtilmiştir. Ökzetik yapıların, darbe kuvvetini çevreye yaymak yerine darbe noktasına odaklayarak yerel rijitliği artırdığı ve iletilen gerilmeyi düşürdüğü belirtilmiştir. Yarı-statik davranışın her zaman dinamik performansı yansıtmadığı belirtilmiş olup düşük hızlarda ökzetik etkisi belirginken, yüksek hızlı darbelerde (yaklaşık 75 m/s ve üzeri) atalet etkilerinin baskın hale geldiği ve şok modu deformasyonunun gözlemlendiği bildirilmiştir. Yüksek hızlı darbe anında ökzetik davranışın etkisi azalmakta ve deformasyon darbe ucunda yerelleşmektedir [35]. Ökzetik çekirdekli sandviç panellerin, mermi ve patlama direnci açısından geleneksel köpük çekirdeklere göre üstün olduğu açıklanmıştır. Ökzetik çekirdek, yüzey levhalarındaki gerilmeyi daha homojen dağıtmış ve lokal kayma hasarlarını azaltarak yapının bütünlüğünü korumuştur. Çalışma, gelecekteki araştırmaların özellikle büyük plastik deformasyon modellerine, yüksek hızlı darbe verilerine, pekleşme davranışının analitik formülasyonuna ve nano-ölçekli ökzetiklerin (nano-auxetics) geliştirilmesine odaklanmasını önermiştir [35]. Zhang ve ark.nın hazırladığı derlemede de bahsedilen geleneksel çubuk tabanlı ökzetik tasarımların burkulma kararsızlıklarını aşmayı hedefleyen Al Hassanieh ve ark., gerçekleştirdikleri çalışmada geleneksel kiriş tabanlı yapıları hibrit plaka tabanlı kafes yapılara dönüştürerek üç yeni re-entrant plaka kafes yapı (LS) tasarlamışlardır [36]. Bu yapılar; düz plaka modifiye ökzetik (FPMA), düz plaka vintile (FPV) ve düz plaka tesseract (FPT) olarak isimlendirilmiştir. SLA yöntemi ile farklı bağıl yoğunluklara (%5, %10, %15 ve %20) sahip çekme ve basma numuneleri üretilmiştir (Tablo 3).

Tablo 3. Tasarlanan birim hücre ve kafes yapılar [36] (Table 3. Designed unit cells and lattice structures [36])

Tür	Birim Hücre Tasarımı	Birim Hücre Parametreleri		$2 \times 2 \times 2$ Kafes Yapısı	Baskılı Numune
Düz Plaka Modifiye Ökzetik		$\rho = 0.049$ $\rho = 0.099$ $\rho = 0.151$ $\rho = 0.201$	$t_{min} = 0.90$ mm $t_{min} = 1.25$ mm $t_{min} = 1.75$ mm $t_{min} = 2.00$ mm		
Düz Plaka Tesseract		$\rho = 0.052$ $\rho = 0.099$ $\rho = 0.148$ $\rho = 0.203$	$t_{min} = 0.40$ mm $t_{min} = 0.65$ mm $t_{min} = 1.00$ mm $t_{min} = 1.90$ mm		
Düz Plaka Vintile		$\rho = 0.052$ $\rho = 0.098$ $\rho = 0.152$ $\rho = 0.199$	$t_{min} = 0.60$ mm $t_{min} = 1.15$ mm $t_{min} = 1.75$ mm $t_{min} = 2.50$ mm		

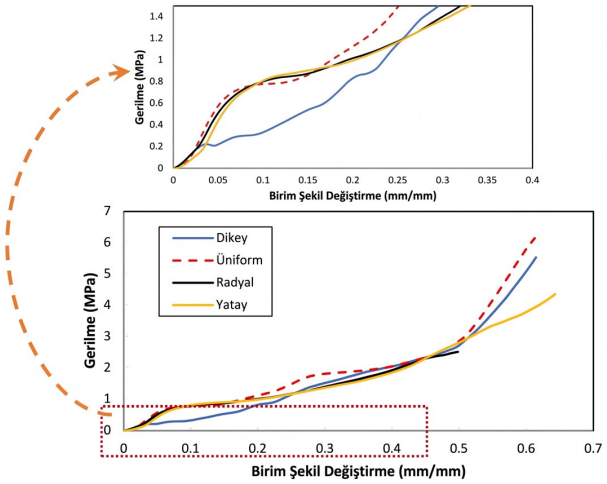
Bu çalışma ile literatürde ilk kez levha tabanlı yeni bir re-entrant kafes mimarisi önerilmiştir. Yarı-statik basma testleri sonucunda, FPMA en yüksek başlangıç rijitliğine sahip yapı olurken, hasar başlangıcı birim hücre elemanlarının burkulmasıyla meydana gelmiştir. Bağıl yoğunluğun artmasıyla elastik modülde ve tepe gerilmesinde en yüksek artışı sergileyen yapı, FPV olmuştur. Ancak bu durum tepe gerilmesi sonrasındaki stabilite kaybı ile sonuçlanmıştır. FPV yapı, düşük bağıl yoğunlukta lokal burkulmalara dayalı sünek bir hasar modu gösterirken, artan bağıl yoğunlukla birlikte rijitliğin artması sonucu sünek davranıştan gevrek kırılma moduna geçiş yapmıştır. FPT ise düşük bağıl yoğunluklarda üniform ve stabil bir ezilme davranışı göstermiştir. Ancak %20 bağıl yoğunlukta orta dikey elemanların erken ezilmesi, yatay plakaların temas ederek yapıyı aniden katılaştırmasına ve yoğunlaşma evresine erken girilmesine neden olmuştur. FPT, 0,7 şekil değiştirmede 4,50 J/g SEA değerine ulaşarak FPV ve FPMA'yı geride bırakmıştır. FPT'nin sunduğu bu yüksek tokluk ve enerji sönümleme verimliliği havacılık gibi hafif ancak yüksek sönümleme gerektiren yük taşıyıcı sistemler için ideal bir aday olduğunu göstermiştir. FPT yapısında, yalnızca %20 bağıl yoğunlukta erken yoğunlaşmaya başlaması sebebiyle SEA değerinde düşüş

gözlemlenmiştir [36]. Choudhry ve ark. ise geleneksel re-entrant ökzetik bal peteği yapılarını geometrik olarak modifiye ederek, bu yapıların düzlemsel (in-plane) enerji sönümleme performansını artırmayı hedeflemişlerdir [37] (Şekil 19).



Şekil 18. a) Geleneksel re-entrant ve b) Geliştirilmiş re-entrant kafes yapıları [37] (Figure 19. (a) Conventional re-entrant and (b) improved re-entrant lattice structures [37])

Re-entrant geometrisindeki düz eğimli çubuklar, toplam uzunluk sabit kalacak şekilde iki parçaya bölünmüştür. Bu işlemle yapıya düşük rotasyonel sertliğe sahip yeni eklem noktaları kazandırılmıştır. Çubuk/uzunluk oranı (eğimli çubukların bölünme oranı), eğim açısı (çubukların yatay düzlemle yaptığı açı) ve eklem açısı (iki eğimli çubuk arasındaki açı) olacak şekilde üç ana değişken belirlenmiştir. Numuneler, ABS polimeri kullanılarak FDM yöntemiyle üretilmiştir. Malzeme modellemesinde ABS'nin çekme ve basma altındaki asimetrik akma davranışını temsil etmek amacıyla Linear Drucker-Prager plastisite modeli ve sünek hasar kriteri tercih edilmiştir. Çalışma sonucunda düşük eklem açılarında ve kısa çubuk oranlarında yapının daha çok küresel burkulma eğilimi gösterdiği, optimize edilmiş tasarımlarda eğilme baskın bir deformasyon modu sergilediği gözlemlenmiştir. Düşük rotasyonel sertliğe sahip düğüm noktalarının eklenmesi, yapının kopma/hasar gerinimini artırarak toplam deformasyon kapasitesini geliştirmiştir. Optimize edilmiş re-entrant yapı, aynı kütleye sahip geleneksel re-entrant bal peteği yapısına kıyasla SEA değerinde %36'lık bir artış sağlamıştır. Eğim açısının, basma mukavemeti üzerinde en yüksek etkiye sahip olduğu, ancak enerji sönümleme kapasitesinin birincil olarak çubuk uzunluk oranına bağlı olduğu saptanmıştır [37]. Ökzetik yapıların bu geometrik gelişimini fonksiyonel gradyan özelliği ile birleştiren Top ve ark., bilgisayar destekli tasarım (CAD) algoritmaları kullanarak katmanlar arasında kademeli geçişler tanımlamış ve fonksiyonel gradyanlı ökzetik kafes yapıların mekanik özellikler ile sönümleme kapasitelerini optimize ederek literatürdeki gradyan-ökzetik entegrasyonu boşluğunu doldurmuştur [38]. Çalışmada polimer esaslı, ökzetik modifiye edilmiş re-entrant yıldız bal peteği, modifiye edilmiş kiral (chiral) ve modifiye edilmiş rotasyonel birim hücrelere sahip gradyanlı yapıların, MJ yöntemiyle üretimi ve enerji sönümleme performansı üzerine araştırma gerçekleştirilmiştir. Gradyanlı yapılar, üniform, yatay (HG), dikey (VG) ve radyal (RG) olmak üzere dört farklı konfigürasyonda tasarlanmış ve çubuk çapları 0,4 mm ile 1 mm arasında kademeli olarak değiştirilmiştir. Numuneler RGD720 fotopolimer reçine ile üretilmiştir. Destek malzemesinin özellikle ince geometrilerde tam olarak temizlenememesi, üretilen parçaların CAD tasarımlarından daha ağır olmasına ve boyutsal sapmalara neden olduğu belirtilmiştir. Ayrıca re-entrant yapılarda yıldız geometrisinden kaynaklı uç bağlantıların zayıf kaldığı tespit edilmiştir. Birim hücrelerinin tamamının Maxwell kriteri kullanılarak incelendiğinde bükülme baskın yapıda olduğu saptanmıştır. Bu durum deneysel olarak da doğrulanmış, kiral ve re-entrant yapıların sünek davranış sergilediği, rotasyonel yapıların ise %24 gerinimden sonra kırılmaya başlayarak gevrek bir karakter gösterdiği belirtilmiştir. Maksimum enerji sönümleme kapasitesi (19,381 J) ve maksimum SEA değeri (3649,905 J/kg) üniform kiral yapıda ölçülmüştür (Şekil 20). Rotasyonel ve re-entrant FGKY'lerin enerji sönümleme kapasitelerinin üniform muadillerinden daha başarılı olduğu saptanmıştır. Dikey gradyanlı (VG) yapılarda deformasyonun ince çubuklu katmanlardan başlayarak kalın katmanlara doğru ilerlediği görülmüştür [38].



Şekil 19. Kiral yapıya ait gerilme-birim şekil değiştirme grafiği [38] (Figure 20. Stress–strain curve of chiral structure [38])

Ökzetik yapıların doğrusal-elastik veya plastik malzeme modelleriyle incelendiği çalışmaların aksine Seyedkazemi ve ark., ökzetik yapılar ile yüksek sönümleme ve enerji sönümleme kapasitesine sahip viskoelastik malzemelerin entegrasyonundan doğan viskoelastik ökzetik malzemeler (VAM) üzerine güncel bir literatür incelemesi sunmuşlardır [39]. Bu çalışma, ökzetik

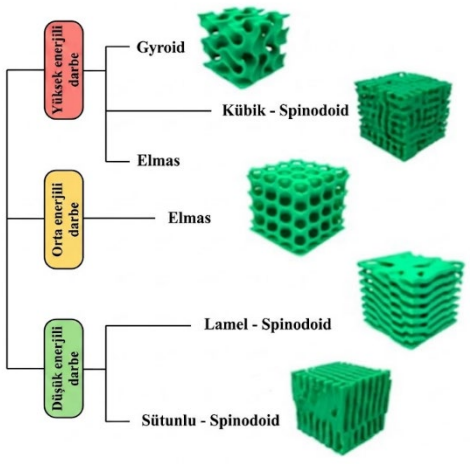
yapıların sunduğu kırılma tokluğu ve girinti direncini, viskoelastik malzemelerin iç sürtünme yoluyla enerji dağıtma yeteneğiyle birleştiren sinerjik bir stratejiyi odağına almaktadır. Çalışmada re-entrant, bal peteği, kiral ve hibrit konfigürasyonlar incelenmiştir. VAM bileşenleri polimerler (PU, TPU, PE, PVC, PA, PLA), elastomerler, kauçuk, epoksi reçine ve karbon/cam fiber takviyeli kompozitler (CFRP/GFRP) ile metal bazlı sistemleri kapsamaktadır. Elde edilen sonuçlar eşliğinde, TPU, şok yüklerine karşı yüksek direnç ve sönümleme kabiliyetiyle öne çıkarken PLA, yüksek enerji sönümleme ile dikkat çekmekte ancak kırılganlığı ve şekil geri kazanımı konusunda sınırlı davranış sergilemiştir. Viskoelastik davranışın sonlu elemanlar analizinde yaygın olarak Kelvin-Voigt, genelleştirilmiş Maxwell ve fraksiyonel kalkülüs modelleri gibi yığılmış parametre (lumped parameter) yaklaşımlarının kullanıldığı belirtilmiştir [39].

Derin deniz cam süngerinin (Euplectella aspergillum) iskelet yapısında bulunan çift çapraz takviyeli (double-diagonal reinforced) konfigürasyondan esinlenerek Zhang ve ark. tarafından yeni bir bionik kafes yapı önerilmiştir [40]. Numuneler, PA11 tozu kullanılarak SLS yöntemiyle üretilmiştir. Hücre boyutu, çubuk kalınlığı ve diyagonal açı gibi parametreler üzerinden tasarımlar yapılmış özellikle çubuk kalınlığının 0,45 mm ile 1,2 mm arasındaki değişimi incelenmiştir. Yapılan yarı-statik basma deneyleri ile çubuk kalınlığının deformasyon mekanizması üzerinde belirleyici bir parametre olduğu ortaya koyulmuştur. İnce çubuklu numunelerde sıfır Poisson oranı gözlemlenirken kalın çubuklu numunelerde gerilme dağılımı daha homojen hale gelmiş ve yapı genelinde üniform bir burkulma izlenmiştir. Bu modda yapı, ökzetik davranış göstermiştir. Çubuk kalınlığının 0,45 mm'den 1,2 mm'ye çıkarılması toplam enerji sönümlemede %745, SEA değerinde %216,5 ve ortalama ezilme kuvvetinde %744,3 oranında artış sağlamıştır [40].

4.4 TPMS kafes yapılar (TPMS lattice structures)

Geleneksel çubuk tabanlı kafes yapılar, yarı-statik ve dinamik yükler altında düğüm noktalarında yüksek gerilme yığılmalarına maruz kalarak erken hasara uğramaktadır [42]. Bu kısıtlamayı aşmak amacıyla geliştirilen TPMS mimarileri, pürüzsüz ve sürekli yüzey tasarımları sayesinde gerilmeyi yapı geneline homojen olarak dağıtmakta ve iyi bir sönümleme kararlılığı sunmaktadır [41, 42].

FDM yöntemiyle üretilen PLA esaslı TPMS hücresel yapıların dinamik yükler altındaki enerji sönümleme kapasiteleri ve deformasyon sonrası şekil geri kazanım performansları Desole ve ark. tarafından incelenmiştir [41]. Yapıların sadece statik değil, tekrarlı dinamik darbelere karşı dayanımı ve termal uyaranla eski formuna dönebilme yeteneği de incelenmiştir. Çalışmada kiriş tabanlı BCC ve FBCC kafes yapılar, TPMS esaslı elmas, Fischer-Koch, FRD, Gyroid, IWP, Nevious, PMY ve Primitive geometrileri ile spinoidal esaslı sütunlu, kübik, isotropic ve lamel olmak üzere stokastik yapılar (Şekil 21) ele alınmıştır. Kiriş tabanlı çalışmalara ek olarak kabuk tabanlı TPMS kafes geometrileri de bu çalışmada yer almıştır.



Şekil 20. TPMS kafes yapıları [41] (Figure 21. TPMS lattice structures [41].)

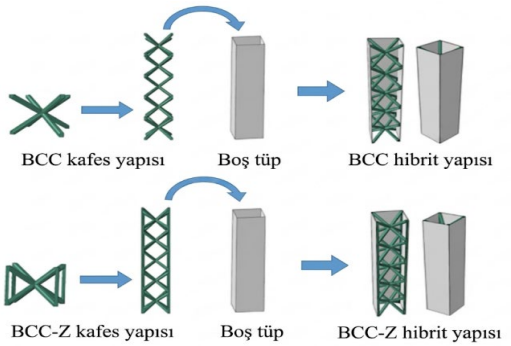
Özel yapım bir düzenekle 6,5 kg'lık bir ağırlık 0,9 m'ye kadar değişen yüksekliklerden bırakılarak yapılar test edilmiştir. Darbe enerjileri düşük (6,4 J), orta (25,5 J) ve yüksek (57,4 J) olmak üzere üç kategoriye ayrılmıştır. Gyroid ve elmas gibi TPMS yapıları, yüksek ve orta enerjili darbelerde en iyi performansı sergilemiştir. Özellikle gyroid yapısı, geometrik sürekliliği sayesinde gerilme konsantrasyonunu minimize etmiş ve üretim kaynaklı iç kusurların etkisini en aza indirerek en fazla döngü sayısına ulaşmıştır. Spinoidal yapılar ise düşük enerjili darbelerde başarılı olsa da döngüsel testlerde aşırı sıkışma/paketlenme etkisi nedeniyle sönümleme kapasitelerini kaybetmiş ve başlangıç yüksekliklerine tam olarak dönmekte zorlanmışlardır. BCC ve FBCC gibi çubuk esaslı yapılar, aynı yoğunluktaki TPMS yapılarına kıyasla çok daha düşük darbe direncine sahip bulunmuştur. Bu yapılar, özellikle düğüm noktalarındaki aşırı gerilme yığılması nedeniyle 0,15 m üzerindeki darbe yüksekliklerinde onarılamaz şekilde kırılmış ve döngüsel testlere uygun bulunmamıştır [41]. TPMS yapılarının tekil bloklar halindeki davranışını yapısal sandviç panellere taşıyan Kladovasilakis ve ark., schwarz elmas kafes çekirdekli sandviç yapıların mekanik davranışlarını incelemişlerdir [42]. Çalışmada, ince yüzey plakalar ve schwarz

elmas TPMS çekirdekten oluşan sandviç yapılar, polimerik malzemeler kullanılarak iki farklı eklemeli imalat yöntemiyle (MJ ve FDM) üretilmiştir. Üretilen bu numunelerin mekanik tepkileri, üç farklı çekirdek bağıl yoğunluğunda hem üç noktalı eğilme deneyleri ile fiziksel olarak test edilmiş hem de sonlu elemanlar analizi ile sayısal olarak incelenmiştir. Çalışma sonucuna göre kafes çekirdekli sandviç yapıların eğilme dayanımı, eğilme modülü ve kesme dayanımı gibi mekanik performans karakteristikleri üzerinde en baskın etkiye sahip olan parametre çekirdeğin bağıl yoğunluğudur. Bağıl yoğunluğun %20, %30 ve %40 olması durumunda FDM numunelerinin tepe kuvvetleri sırasıyla 6004 N, 9438 N ve 15481 N olarak gerçekleşmiştir. Aynı bağıl yoğunluk seviyelerinde MJ numuneleri için ulaşılan tepe kuvvetleri sırasıyla 1944 N, 4780 N ve 8654 N olarak kaydedilmiştir [42].

4.5 Hibrit ve IPC kafes yapılar (Hybrid and IPC lattice structures)

Tek bir malzemeden üretilen geleneksel kafes yapılar, belirli bir yük limitinin ardından kırılgan hasar modları veya ani bükülme kararsızlıkları sergileyerek sönümleme verimliliklerini kaybedebilmektedir. Bu kısıtlamayı aşmak amacıyla geliştirilen hibrit tasarımlar ve IPC, iki veya daha fazla malzemenin avantajlarını mikroskobik ya da makroskobik düzeyde bir araya getirmektedir [46, 48]. Güncel çalışmalar, ince cidarlı tüplerin kafes yapılarla güçlendirilmesinden, metal/seramik kafes iskeletlerin esnek elastomer veya poliüre (polyurea) matrislerle doldurulmasına kadar geniş bir alanda çeşitlilik göstermektedir [43, 47, 50]. Bu çok fazlı mimarilerde temel amaç fazlar arası yük aktarım mekanizmalarından yararlanarak yapının erken hasara uğramasını engellemek, akma dayanımını artırmak ve ezilme esnasında sürekli bir enerji sönümleme kapasitesi elde etmektir [49, 51]

Kiriş tabanlı kafes yapılar ile hibrit bir sistem oluşturulması konusunda Cetin ve ark., gerçekleştirdikleri çalışmada, geleneksel ince cidarlı boru yapıların içini periyodik kafes yapılarla doldurarak hibrit enerji sönümleme sistemleri geliştirmeyi ve bu sistemlerin eksenel darbe yükleri altındaki davranışlarını incelemeyi amaçlamışlardır [43]. Araştırmada, düşey çubuk içermeyen, daha çok eğilme baskın davranış sergileyen BCC ile BCC yapısına eksenel yükleme doğrultusunda düşey çubukların eklendiği daha rijit ve mukavemetli yapı olan BCC-Z birim hücre topolojileri ele alınmıştır (Şekil 22).



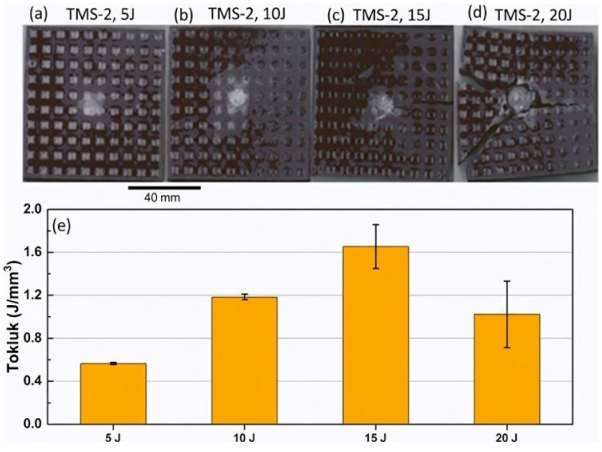
Şekil 21. BCC ve BCC-Z yapıların ince cidarlı kare kesitli yapıların içerine yerleştirilmesi [43]
(Figure 22. Integration of BCC and BCC-Z structures into thin-walled square cross-section structures [43])

Kare kesitli ince cidarlı Al6063-T5 alaşımı tüpler, AlSi10Mg malzemesinden DMLS (Direct metal laser sintering) yöntemiyle üretilen kafes yapılarla doldurulmuştur. Tasarım değişkenleri olarak, kafes birim hücre sayısı (3-7 arası), kafes eleman çapı (1-5 mm) ve tüp et kalınlığı (0,5-1,5 mm) belirlenmiştir. AlSi10Mg kafesler için polimer malzeme analizinde de kullanılan [16] Johnson-Cook plastisite modeli ve sünek hasar kriteri kullanılmıştır. Çalışmanın en önemli bulgusu, tüp ve kafes yapı arasındaki karşılıklı takviye etkisi olarak açıklanabilecek burkulma direncidir. Kafes dolgu dış tüpün içeriye doğru çökmesini engellerken, dış tüpün de kafes yapının yanal olarak genişlemesini kısıtladığı belirtilmiştir. Düşük narinlik oranına sahip hibrit yapılar katmanlı çökme sergilerken, narinlik oranı arttıkça ve çubuk çapı kalınlaştıkça yapıda küresel burkulma eğilimi gözlemlenmiştir. Özellikle 7 hücreli yapılar, ince tüplerle birleştiğinde küresel burkulma nedeniyle beklenen verimi gösterememiştir. Hibrit tasarımlar, parçaların tekil toplamlarından çok daha yüksek performans sergilemiştir. Hibrit yapıların, kendilerini oluşturan tekil durumlarına kıyasla %115'e kadar daha fazla enerji sönümleyebildiği belirtilmiştir. BCC-Z dolgulu hibrit yapılar, düşey çubukların sağladığı ekstra stabilite sayesinde, BCC dolgulu yapılara göre tüm konfigürasyonlarda daha yüksek enerji sönümleme değerlerine ulaşmıştır [43].

Esnek polimer kompozit malzeme özelliklerinin üç boyutlu ökzetik kafes yapıların sönümleme performansı üzerindeki rolü Tolochyna ve ark. tarafından gerçekleştirilen çalışmada ele alınmıştır [44]. Periyodik ökzetik kafes yapıların enerji sönümleme kapasiteleri beş farklı polimer ve kompozit filamentin mekanik özellikleri ekseninde incelenmiştir. FDM ile üretilen PLA, kompozit fiber takviyeli PLA, seramik partikül takviyeli PLA, TPU ve karbon fiber takviyeli naylon malzemelerin mukavemet, plastisite ve viskoelastisite oranlarının,

üretilen ökzetik yapıların sönümleme performansına olan etkileri incelenmiştir. Çalışma sonuçlarına göre TPU ve naylon fiberlerin mukavemet ve sertlik açısından PLA filamentinden daha zayıf olduğu ancak şok yüklerine dayanma ve sönümleme kabiliyeti açısından PLA'yı geride bıraktığı saptanmıştır. Özellikle TPU filamentinin, diğer malzemelere göre yaklaşık 20 kat daha fazla darbe direnci sergilediği kaydedilmiştir. Gerinim enerjisi sönümleme performansları incelendiğinde PLA yapılar, yüksek enerji sönümleme değeri sunabilirken gevrek davranış sergilemişlerdir. TPU yapılar ise şekil geri kazanımı açısından iyi performans sunmalarına rağmen naylon ve PLA'ya kıyasla düşük enerji sönümleyebilmiştir. Araştırmacılar, kafes yapıların optimizasyonu için farklı plastisite ve sönümleme yeteneklerine sahip malzemelerin bir arada kullanıldığı hibrit/kombine kafesler önermişlerdir [44].

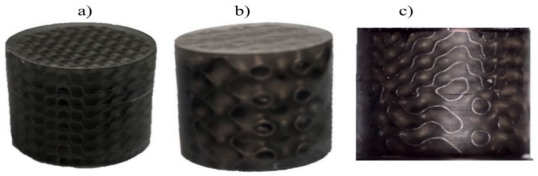
Polimerik matrislerin darbe sönümleme kapasitesini katmanlı hibrit plakalar üzerinden gerçekleştiren Al-Areqi ve ark., PLA tabanlı kafes yapıları epoksi ve mikro cam lifleri (MGF) ile birleştirerek, çok katmanlı kompozit yapıların darbe yükleri altındaki penetrasyon direncini ve kırılma tokluğunu önemli bir biçimde artıran özgün bir malzeme kombinasyonu sunmuştur [45]. FDM ile üretilen PLA iskeletler, hacimce %50 PLA yapısı ve %50 dolgu malzemesi içerecek şekilde tasarlanmıştır. MGF hacim oranı %0 (BMS), %2,5 (TMS-1), %5 (TMS-2) ve %7,5 (TMS-3) olarak tasarım değişkenleri belirlenmiştir. Numuneler, düşük hızdaki darbe davranışlarını belirlemek amacıyla farklı enerji seviyelerinde (5 J, 10 J, 15 J ve 20 J) darbe testlerine tabi tutulmuştur (Şekil 23).



Şekil 22. 5J, 10 J, 15 J ve 20 J darbe testi sonrası numuneler [45] (Figure 23. Specimens after impact tests at 5 J, 10 J, 15 J, and 20 J [45])

MGF içeriğindeki artışın, numunelerin darbe yüklerine karşı direncini ve tokluğunu belirgin şekilde artırdığı saptanmıştır. İncelenen seriler arasında %7,5 MGF içeren TMS-3 numuneleri, en düşük elyaf içerikli gruplara kıyasla en üstün performansı sergilemiştir. 15J enerji seviyesinde yapılan karşılaştırmalarda, elyaf takviyesinin tepe kuvvetini ve enerji sönümlemesini optimize ettiği görülmüştür. TMS-2 numunelerinin, uygulanan enerjinin ortalama %90,63'ünü soğurarak yüksek bir sönümleme verimliliği gösterdiği belirtilmiştir. 5J ve 10J gibi düşük enerji seviyelerinde numuneler darbeyi başarıyla karşılarken, 20J enerji seviyesinde numunelerde kırılma meydana gelmiş ve yer değiştirme miktarı 9,46 mm'ye kadar keskin bir artış göstermiştir [45].

Makroskopik katmanlı ve dolgulu hibrit çözümlerden, fazların mikron ölçeğinde birbiri içine geçtiği IPC mimarilerine geçişe yönelik çalışmalar Novak ve ark. tarafından gerçekleştirilmiştir [46]. Dört temel TPMS geometrili (schwarz gyroid, schwarz primitive, schwarz elmas ve schoen IWP) ve SLM yöntemiyle üretilen paslanmaz çelik (316L) yapıların polimerik malzemelerle (silikon ve epoksi) infiltre edilmesi sonucu oluşan geçmeli fazlı kompozitlerin yarı-statik ve yüksek hızdaki darbe davranışlarını incelemişlerdir (Şekil 24).

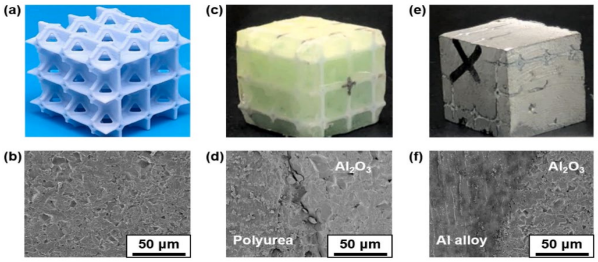


Şekil 23. Epoksi dolgulu a) Primitive, b) Elmas-gyroid hibrit kafes ve c) Örnek yapılar [46] (Figure 24. Epoxy-filled (a) Primitive, (b) diamond–gyroid hybrid lattice, and (c) sample structures [46].)

Çalışma kapsamında 4x4x4 birim hücrelik örüntüye sahip, 20 mm çapında ve 20 mm yüksekliğinde silindirik numuneler üretilmiştir. Gerçekleştirilen test sonuçlarına göre yarı-statik yükleme ile yüksek hızdaki darbe yüklemesi arasında belirgin farklar olduğu belirtilmiştir. Silikon matris kullanımı yapısal rijitlikte bir artış sağlasa da SEA değerlerinde belirgin bir iyileşme kaydedilmemiştir. Epoksi matris kullanımı, SEA değerinde %38'e varan dramatik bir artış sağlamıştır. Bu artış, epoksinin metalik fazın deformasyonunu mekanik olarak kısıtlaması ve birbirine geçme mekanizması sayesinde iskelet kollarının erken burkulmasını önlemesiyle açıklanmıştır. Ayrıca Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB) testleri, yapıların belirgin bir gerinim hızı sertleşmesi sergilediğini de göstermiştir [46].

Seramik malzemelerin yüksek basma mukavemetini IPC konseptine dahil etmek isteyen Gao ve ark., kırılgan seramik plaka kafes yapıları

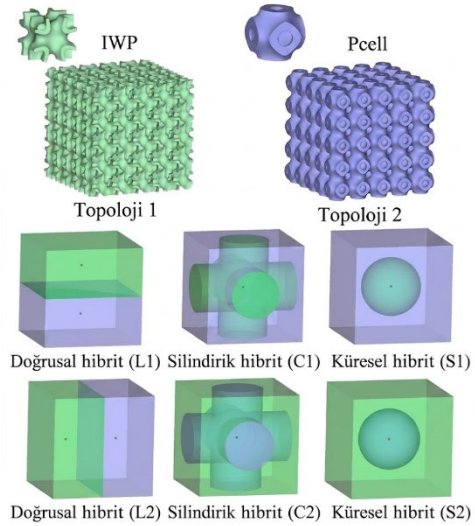
poliüre ve alüminyum alaşımı gibi yumuşak fazlarla infiltre ederek karşılaştırmalı bir dinamik mekanik analiz sunmuştur [47]. Sert iskelet ile yumuşak dolgu arasındaki şok sönümleme mekanizmasını kanıtlayarak metal-polimer IPC çalışmalarından ayrışmıştır. Seramik plaka kafes yapılar (CPLS) ve bu yapıların poliüre ve alüminyum alaşımı gibi yumuşak fazlarla takviye edildiği geçmeli fazlı kompozitlerin, dinamik mekanik davranışlarını karşılaştırmalı olarak incelemişlerdir. Araştırmada seramik plaka kafes yapılar ana iskelet olarak kullanılmış ve bu yapılara poliüre ile alüminyum alaşımı dolgulu iki farklı yumuşak faz infiltre edilmiştir (Şekil 25).



Şekil 24. a) ve b) Seramik iskeletlerin c) ve d) Poliüre dolgulu iskeletlerin e) ve f) Aluminyum dolgulu yapıların makroskobik ve mikroskopik görüntüleri [47] (Figure 25. (a, b) Ceramic scaffolds, (c, d) polyurea-filled scaffolds, and (e, f) aluminum-filled structures: macroscopic and microscopic images [47])

Saf Al_2O_3 seramik plaka kafes yapılar; seramik iskelet (CPLS), seramik iskeletin hiperelastik bir polimer olan poliüre ile doldurulduğu kompozitler, poliüre dolgulu yapılar (P/CPLS) ve seramik iskeletlerin grafit potalar içinde AlSi10Mg alaşım tozu ile doldurulmuş ve 900°C'de 2 saat boyunca vakum altında eritilerek infiltrasyon sağlanmış kompozitler, alüminyum dolgulu yapılar (A/CPLS) olarak ifade edilmiştir. Tasarım değişkenleri %20, %25 ve %30 (CPLS-20, CPLS-25, CPLS-30) bağıl yoğunluklara sahip iskelet yapılar olarak belirtilmiştir. Yapılan yarı-statik basma testlerinde iskelet yoğunluğu arttıkça mekanik özelliklerin doğrusal olmayan bir şekilde iyileştiği gösterilmiştir. CPLS-30 numunesi 69,87 N-m/g özgül gerilme ve 0,81 J/g SEA kapasitesi değerine ulaşmıştır. Alüminyum dolgulu A/CPLS sistemi, ilk yükleme döngüsünde 0,68 J/g SEA değeri sunarken, ardışık döngülerde bu değerin 2,79 J/g seviyesine çıktığı görülmüştür [47].

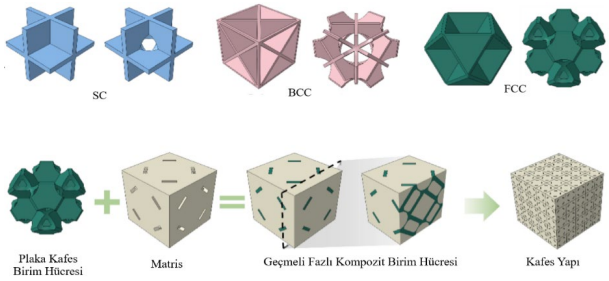
Üç boyutlu hibrit mimarili malzemelerin ve birbiri içine geçmiş fazlı kompozitlerin tasarım prensiplerini ve mikromekanik modelleri Mehraj ve ark. tarafından incelenmiştir [48]. TPMS tabanlı yapıların ve geçmeli fazlı kompozitlerin statik ve dinamik yükler altındaki performansını artırmak amacıyla üç boyutlu hibritleşme modelleri önermişlerdir. Çalışmada silindirik ve küresel hibritleşme modellerinin mekanik özellikler üzerindeki etkileri incelenmiş, mekanik olarak rijit olan Schoen's wrapped package (IWP) yapısı ile nispeten yumuşak olan Primitive (P-Cell) yapısı temel bileşenler olarak seçilmiştir (Şekil 26). Çalışmada bu iki topoloji doğrusal (topolojik geçiş sadece yükleme ekseni (Z) boyunca olduğu), silindirik (hibritleşmenin radyal bir düzende merkezden dışa doğru olduğu) ve küresel (topolojilerin küpün merkezinden köşelerine doğru küresel bir geometride yer değiştirdiği) düzlemde birleştirilerek farklı numuneler elde edilmiştir [48].



Şekil 25. Doğrusal, silindirik ve küresel hibritleşme modelleri [48] (Figure 26. Linear, cylindrical, and spherical hybridization models [48])

IPC numuneleri üretilirken, sert takviye fazı olarak VeroPureWhite, yumuşak matris fazı olarak ise kauçuk benzeri TangoBlack malzemesi kullanılmıştır. Numuneler, yarı-statik (0,001 s^{-1}), orta hızlı darbe (4 s^{-1}) ve yüksek hızlı darbe (400 s^{-1}) hızlarında test edilmiştir. Küresel hibrit yapıların (özellikle S2 konfigürasyonu), hem elastik modül (71-72 MPa) hem de tepe gerilmesi (2,73-2,78 MPa) açısından doğrusal ve silindirik modellere göre belirgin bir şekilde daha üstün bir performans sergilediği saptanmıştır. Yükleme hızı arttıkça tüm yapıların belirgin bir gerinim hızı sertleşmesi gösterdiği belirtilmiştir. S2 tasarımı, 400 s^{-1} gibi yüksek yükleme hızlarında 17 J/g değerine ulaşan SEA ile en yüksek verimliliği sunmuştur. Ayrıca doğrusal hibritlerin (L1) gerilme-gerinim eğrilerinde, yumuşak fazdan sert faza geçiş esnasında karakteristik bir düşüş ardından ikincil bir tepe noktası gözlemlendiği ve bu durumun kademeli ezilmenin bir sonucu olduğu belirtilmiştir. Küresel yapılarda ise yük transferinin merkezden dışa doğru daha dengeli dağıldığı ifade edilmiştir [48].

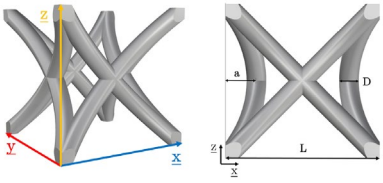
Levha tabanlı metal IPC yapılara, katmanlı imalatla üretilen hücresel levha iskeletleri ikincil bir faz ile birleştiren Wang ve ark., hem çok yüksek bir akma dayanımı hem de plato bölgesinde kararlı bir SEA değeri elde etmişlerdir [49]. Çalışmada, LTYF eklemeli imalat yöntemiyle üretilmiş paslanmaz çelik (316L) plaka kafes iskeletlerin içerisine epoksi reçine matrisi doldurularak elde edilen IPC yapılar incelenmiştir. Tek eksenli yarı-statik basma testleri gerçekleştirilmiş ve sonlu elemanlar analizi uygulanarak bu kompozitlerin mekanik performansı ile deformasyon davranışları ortaya koyulmuştur [49]. Çalışmada, kapalı hücreli plaka kafeslerin üretim sonrasında içlerinde kalan tozların temizlenmesindeki zorlukları aşmak amacıyla, SC, BCC ve FCC topolojiler tercih edilmiştir (Şekil 27).



Şekil 26. Eklemeli imalatla üretilmiş, plaka kafes mimarisine sahip iç içe geçmiş kompozitlerin tasarım ve üretim süreçlerinin şematik gösterimi [49] (Figure 27. Schematic representation of the design and manufacturing processes of interpenetrating composites with plate-lattice architecture produced by additive manufacturing [49])

Gözenekli metalik iskeletlerin epoksi reçine ile doldurulmasının elastik modülü ve akma dayanımını önemli ölçüde artırdığı bildirilmiştir. İncelenen yapılar arasında SC iskeleti en yüksek elastik modülüne ve akma dayanımına sahipken, BCC iskeleti en düşük değere sahiptir. Gözenekli metalik iskelet yapılarda karşılaşılan ani kayma bantları, epoksi matrisin yapıya dahil edilmesiyle önemli ölçüde giderilmiş ve kompozitler oldukça stabil bir basma davranışı sergilemiştir. IPC yapılarının SEA kapasitesi, saf metalik iskeletlere kıyasla topoloji ve hacim oranına bağlı olarak %27,16 ile %290,71 arasında artış göstermiştir. SEA'daki en yüksek artış (%290,71) BCC yapısında görülmüş olup, SC ve FCC topolojilerine sahip plaka tabanlı kompozit yapıların, literatürde yer alan birçok kafes yapıya kıyasla daha iyi bir SEA kapasitesine sahip olduğu bildirilmiştir [49].

Metal iskeletlerin darbe esnasında kırılma veya bükülme nedeniyle erken hasar almasının ertelenmesi amacıyla Albertini ve ark., LTYF ile üretilmiş ökzetik Ti-6Al-4V metalik kafes yapıların, yumuşak bir poliüretan elastomer ile doldurularak hibrit hale getirilmesini ve bu işlemin hasar mekanizmaları üzerindeki etkilerini X-ışını mikrotomografisi ile incelemişlerdir [50]. Katmanlı imalat üretiminde iç destek yapılarına duyulan ihtiyacı azaltmak amacıyla, basım tablasıyla 20 dereceden daha küçük açı yapan eğik çubukların çıkarıldığı modifiye edilmiş ökzetik birim hücreler kullanılmıştır (Şekil 28).



Şekil 27. Periyodiklik vektörleri x, y, z (sol) ve geometrik parametreleri (sağ) ile modifiye edilmiş ökzetik birim hücre. [50] (Figure 28. Modified auxetic unit cell with periodicity vectors x, y, z (left) and geometric parameters (right) [50])

Çalışmalarda, hücre boyutu (L) 3 mm (L3) ve 4 mm (L4) olmak üzere iki farklı geometrik konfigürasyon tercih edilmiştir. Bu bağlamda, genlik (a) ve hücre boyutu sabit tutulup çubuk çapları ayarlanarak her iki hücre boyutu için %5, %10, %15, %20 ve %25 olmak üzere beş farklı yoğunluklu yapılar tasarlanmıştır. Mekanik özelliklerin ve enerji sönümleme karakteristiklerinin elde edilmesi amacıyla numuneler, 5 kN yük hücresine sahip Instron 5581 üniversal test cihazında yarı-statik basma testlerine tabi tutulmuştur. Çalışma sonucunda metalik kafes yapılarda görülen düğüm noktası çatlamalarının ve ani kayma bandı oluşumunun, elastomer dolgu fazı sayesinde önemli ölçüde geciktiği mikrotomografik incelemeler ile ortaya koyulmuştur. Yumuşak polimer faz, yapıya binen gerilmeyi homojen bir şekilde dağıtarak ve lokal çatlaklar arasında köprü kurarak, kafes çubuklarının daha uzun süre yük taşımasını ve yapının kademeli olarak çökmesini sağlamıştır. Ancak, çarpışma direnci bağlamında polimer dolgunun yapıya eklediği ilave kütle, başlangıç rijitliğini, kütleyle orantılı düzeyde artırmadığı için SEA değerlerinde %52 ile %63 arasında yapısal düşüşler meydana gelmiştir [50].

Eklemeli imalat ile biyo-esinimli hücresel seramik yapı/poliüre (CCS/poliüre) çift fazlı birbirine geçen kompozit yapıların dinamik mekanik yanıtları ve tekrarlı çarpışma altındaki enerji sönümleme performansları Zhang ve ark. tarafından gerçekleştirilen çalışmada ele alınmıştır [51]. Çalışmada, Split Hopkinson basınç çubuğu sistemi kullanılarak 6±0,5 m/s ve 12±0,7 m/s gibi yüksek darbe hızlarında dinamik testler gerçekleştirilmiştir. Yapılara, basma dayanımları ilk döngüde elde edilen maksimum değerin %30'una düşene kadar ardışık (cyclic) olarak yüklenilmiştir. CCS/poliüre

çift fazlı yapının kalıcı hasar öncesindeki toplam deformasyon limiti, uygulanan yükleme düzeninden bağımsız olarak sabit kalmıştır. Polimer fazın sağladığı darbe sönümleme etkisi sayesinde, biyo-esinlenilmiş çift fazlı yapının 40,28 MPa gibi bir basma gerilmesinde yaklaşık 200 adet ardışık darbe döngüsüne dayanabildiği tespit edilmiştir. Bununla birlikte dinamik analizler, darbe hızının ve döngüsel yükleme şiddetinin artmasının, yapının hasar almadan dayanabileceği döngü sayısını ve sönümleyebileceği toplam enerjiyi önemli ölçüde azalttığını göstermiştir. Geliştirilen CCS/poliüre kompozitler, geleneksel kafes yapılar, metal/polimer köpükler ve doğal hücresel malzemeler ile karşılaştırıldığında, dinamik yükler altında hem daha yüksek özgül dayanım hem de daha fazla enerji sönümleme döngüsü sunmuştur [51].

FGKY'lerin enerji sönümleme performansını inceleyen güncel literatürün sistematik bir özeti Tablo 4'de verilmiştir. Tablo incelendiğinde araştırmalardaki genel eğilimin ilk yıllarda yarı-statik yükler altındaki homojen, tek fazlı ve basit çubuk tabanlı metalik yapılara odaklandığı görülmektedir. Ancak katmanlı imalat teknolojilerinin gelişmesiyle birlikte araştırma odağının dinamik darbe rejimlerine, doğadan esinlenen hiyerarşik topolojilere, yüzey tabanlı TPMS geometrilerine ve son yıllarda yapısal kırılganlıkları aşmak amacıyla geliştirilen ikincil faz dolgulu hibrit (IPC) kompozit mimarilere doğru evrildiği ortaya çıkmaktadır.

Tablo 4. İncelenen kafes yapıların araştırma odağı ve bulgularına ait özet (Table 4. Summary of the research focus and findings of the investigated lattice structures.)

Ref.	Kafes Tipi	Malzeme	Araştırma Odağı	Metodoloji	Bulgular
[11]	Kiriş tabanlı tam üçgenleştirilmiş kafes	Metalik kafes (teorik/genel)	Mekanik davranış	Analitik / Deneysel	Temel elastik modül ve akma sınırları formülize edilmiştir.
[12]	Radyal yönde çift yoğunluklu gradyanlı rombik dodekaedron + kübik hibrit kafes	Ti-6Al-4V	Yüksek mukavemet ve sönümleme	Deneysel	FGKY'ler üniform yapılara göre çok daha kararlı ezilme sunmuştur.
[13]	Çekme baskın kagome, bcc, f2cc, fcc ve f2bcc konfigürasyonları	Ti-6Al-4V	Hasar ve sönümleme karakteristikleri	Deneysel / SEY	Düğüm noktalarındaki yerel burkulma ve hasar modları belirlenmiştir.
[14]	Katmanlar boyunca çubuk çapı doğrusal gradyanlı kübik ve bal peteği kafes	Ti-6Al-4V	Yarı-statik basma özellikleri	Deneysel	Üretim parametreleri sönümleme kapasitesini doğrudan etkilemiştir.
[15]	Dairesel, sekizgen, güçlendirilmiş sekizgen, kelvin, rhombicuboctahedron ve kübik	PA12 Polimeri	Optimum SEA	Deneysel	MJ teknolojisi ile sönümleme için üretim parametreleri optimize edilmiştir.
[16]	Çubuk çapı ve hücre yüksekliği kademeli değişen gradyanlı BCC kafes	PA12 Polimeri	Mekanik özellikler ve SEA	Deneysel / SEY	Doğrusal gradyanlı modeller deneylerle doğrulanmıştır.
[17]	Eksenel ve radyal yönde malzeme kalınlığı gradyanlı elmas ve dikey-eğimli kafes	PA12 Polimeri	Burulma özellikleri	Deneysel	Gradyan yönü yapının burulma direncini doğrudan etkilemektedir.
[18]	Tek yönlü (UDFG) ve çift yönlü (BDFG) çubuk çapı gradyanlı BCC kafes	PA11 Polimeri	Ezilme davranışı	Deneysel / SEY	Farklı yoğunluk gradyanlarının ezilme modlarına incelenmiştir
[19]	Hiyerarşik dairesel (HCirC)	Akrilat foto-kürlemeli sert reçine (hard-tough resin)	Basma ve deformasyon davranışları	Deneysel / SEY	Pürüzsüz deformasyon modu ve yüksek SEA elde edilmiştir.
[20]	Tek yönlü (UGL) ve çift yönlü (BGL) yoğunluk gradyanlı BCC kafes	AlSi10Mg Alüminyum Alaşımı	Basma özellikleri	Deneysel / SEY	Biyonik tasarım SEA kapasitesini yaklaşık %170 oranında artırmıştır.

Tablo 4. İncelenen kafes yapıların araştırma odağı ve bulgularına ait özet (devamı) (Table 4. Summary of the research focus and findings of the investigated lattice structures (continued))

Ref.	Kafes Tipi	Malzeme	Araştırma Odağı	Metodoloji	Bulgular
[21]	Mikro ölçekli paslanmaz çelik kafes yapı	Paslanmaz Çelik (SS316)	Basma özellikleri	Deneysel	Mikro ölçekteki deformasyon limitleri tanımlanmıştır.
[22]	FCCZ, BCCZ, FBCCZ, elmas ve rombik dodekaedron kafes yapılar	Ti-6Al-4V	Hasar modları	Deneysel / SEY	Katmanlı imalat kaynaklı süneklik kaybı tespit edilmiştir.
[23]	Z-ekseninde dikey dikmelerle takviye edilmiş BCCZ, FCCZ ve FBCCZ kafes yapılar	Metalik/Polimerik Model (Genel Deformasyon Modellemesi)	Doğrusal olmayan mekanik modelleme	Analitik / SEY	Büyük şekil değiştirmeler için statik/dinamik analitik modeller sunulmuştur.
[24]	Topoloji ve çubuk çapı bazlı gradyanlı BCC, rombik dodekaedron ve octet hibrit kafes	PA11 Polimeri	Yoğunluk gradyanı stratejileri	Deneysel / SEY	Periyodik gradyanın doğrusal olana göre daha kararlı olduğu görülmüştür.
[25]	Bükme baskın ve çekme baskın (FCCZ, FCCXYZ) gradyanlı kafes yapılar	Ti, Al, SS, polimerler	Tasarım ve mekanik yanıt	Derleme	FGKY kafeslerin endüstriyel uygulamaları değerlendirilmiştir.
[26]	Logaritmik, doğrusal, üstel, basamak ve yoğunluk gradyanlı BCC kafes	Ti-6Al-4V Alaşımı	Yoğunluk gradyanı etkisi	Deneysel / SEY	Gradyanın katman katman çökme modundaki baskın rolü kanıtlanmıştır.
[27]	İçi boş duvarlı sabit kalınlıklı ve değişken kesitli daralan BCC, FCC, elmas ve rd kafesler	TWIP Çeliği	SEA	Deneysel / SEY	İçi boş yapıların kütlesel sönümlemede dolu çubukları geçtiği görülmüştür.
[28]	Çekme baskın yüzey merkezli oktet-truss polimerik kafes yapı	Gevrek (grey) reçine ve sünek (durable) reçine	Dinamik ve yarı-statik basma	Deneysel	Yüksek şekil değiştirme hızında malzemede sertleşme gözlenmiştir.
[29]	Periyodik ve rastgele (stokastik) dağılımlı voronoi, kübik, oktet ve delaunay kafes yapılar	Al-6101 T6 alaşımı	Enerji sönümleme	Deneysel / SEY	Rastgele dağılımların yerel gerilme yığılmalarını azalttığı kanıtlanmıştır.
[30]	Kübik, kare piramidal ve çapraz piramidal çekirdekli köpük dolgulu hibrit yapılar	ABS polimer iskelet + poliüretan köpük matris	Düşük hızlı darbe sönümleme	Deneysel	Köpük dolgunun erken burkulmayı başarıyla geciktirdiği görülmüştür.
[31]	Hücre topolojisi, boyutu veya et kalınlığı gradyanlı kafes yapılar	Çeşitli mühendislik malzemeleri	SEA topoloji ilişkisi	Derleme	Farklı geometrilerin sönümleme sınırları özetlenmiştir.
[32]	Tek yönlü monotonik ve çift yönlü merkezden dışa yoğunluk gradyanlı BCC kafes	SS 316L Paslanmaz Çelik	Dinamik basma ve şok dalgası	Deneysel / SEY	Gradyan stratejisinin dinamik şok dalgalarını sönümlediği kanıtlanmıştır.
[33]	Hücresel, petek ve köpük formunda çeşitli gözeneklilik gradyanlı yapılar	Metal, seramik, polimer, beton, cam + CNT/GPL nano dolgular	Performans ve uygulamalar	Derleme	Otomotiv ve havacılıktaki çarpışma/darbe uygulamaları derlenmiştir.

Tablo 4. İncelenen kafes yapıların araştırma odağı ve bulgularına ait özet (devamı) (Table 4. Summary of the research focus and findings of the investigated lattice structures (continued))

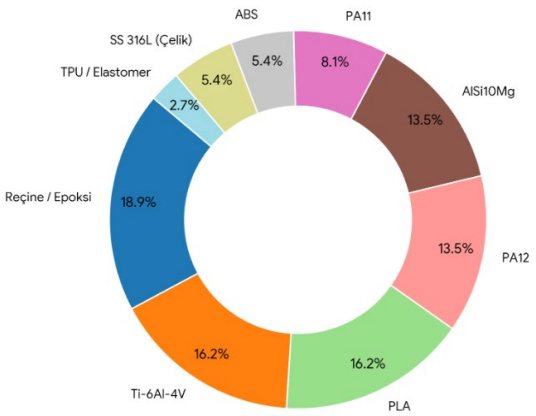
Ref.	Kafes Tipi	Malzeme	Araştırma Odağı	Metodoloji	Bulgular
[34]	Homojen BCC ve genişletilmiş plato sunan dalgalı BCC (WBCC) kafes yapılar	Polimer	SEA kapasitesinin kıyaslanması	Deneysel	WBCC yapısının BCC'ye göre daha geniş bir plato bölgesi sunduğu kanıtlanmıştır.
[35]	Çubuk tabanlı konvansiyonel re-entrant, ok başı ve yıldız şekilli ökzetik geometriler	Çeşitli mühendislik malzemeleri	Büyük deformasyon altında SEA	Derleme	Ökzetik tasarımların içe kapanma mekanizmaları açıklanmıştır.
[36]	Levha tabanlı re-entrant düz plaka modifiye ökzetik, düz plaka vintile ve tesseract	Foto-kürlemeli polimerik reçine	Mekanik özellikler ve SEA	Deneysel / SEY	Levha tabanlı tasarımların çubuk tabanlılara üstünlüğü gösterilmiştir.
[37]	Düşük rotasyonel sertlikli düğüm noktalarına sahip modifiye re-entrant ökzetik bal peteği yapısı	ABS Polimeri	Düzlem içi enerji sönümleme	Deneysel	Geometrik modifikasyonla düzlem içi sönümleme ciddi şekilde artırılmıştır.
[38]	Çubuk çapı kademeli geçişli ökzetik re-entrant yıldız bal peteği, kiral ve rotasyonel klasik kafes	RGD720 fotopolimer reçine	CAD destekli sönümleme artışı	SEY / Deneysel	CAD parametreleriyle sönümleme kararlılığı optimize edilmiştir.
[39]	Re-entrant, bal peteği, kiral ve hibrit geometrili viskoelastik ökzetik yapılar	Viskoelastik polimerler (PU, TPU, PE, PVC, PA, PLA), Elastomer, Kauçuk, Epoksi	Zaman/sıcaklık bağlı mekanizmalar	Derleme	Ökzetik yapıların viskoelastik sönümleme davranışları özetlenmiştir.
[40]	Derin deniz cam süngeri esintili çift çapraz takviyeli bionik kafes yapı	PA11 polimer tozu	Düzlem içi ezilme davranışları	Deneysel / SEY	Biyo- gözenek mimarisinin pürüzsüz bir plato yarattığı görülmüştür.
[41]	Kiriş tabanlı (BCC, FBCC) ve TPMS (elmas, gyroid, fischer-koch, ıwp, primitive vb.) metamalzemeler	PLA akıllı polimer (şekil hafızalı)	Dinamik yükler ve şekil geri kazanım	Deneysel	Darbe sonrası akıllı şekil geri kazanım özelliği kanıtlanmıştır.
[42]	İnce yüzey plakalı schwarz elmas TPMS çekirdekli sandviç panel	Fotopolimerik Reçine (MJ) ve standart polimer (FDM PLA)	Bükülme ve ezilme modları	Deneysel / SEY	Pürüzsüz yüzeylerin gerilmeyi homojen dağıtarak hasarı ertelediği görülmüştür.
[43]	Kare kesitli ince cidarlı tüp içi periyodik BCC ve BCC-Z kafes dolgulu hibrit sistem	Al6063-T5 alaşımı dış tüp + AlSi10Mg metalik kafes dolgu	Tüplerin sönümleme artışı	Deneysel / SEY	Kafes dolgusunun tüp katlanma modlarını kararlı hale getirdiği kanıtlanmıştır.
[44]	Üç boyutlu periyodik ökzetik kafes iskelet + esnek matris entegrasyonu (IPC)	PLA, karbon/seramik takviyeli PLA, TPU, karbon elyaf naylon	Esnek matrisin ökzetik rolü	Deneysel	Esnek dolgunun hücrelerin içe kapanma etkisini desteklediği görülmüştür.
[45]	Çok katmanlı PLA hücresel iskelet + mikro cam lifi takviyeli epoksi dolgulu IPC	PLA iskelet + epoksi / MGF (micro glass fiber) matris	Darbe davranışı ve penetrasyon	Deneysel	Çok fazlı yapının kırılma tokluğu ve penetrasyon direnci artırılmıştır.

Tablo 4. İncelenen kafes yapıların araştırma odağı ve bulgularına ait özet (devamı) (Table 4. Summary of the research focus and findings of the investigated lattice structures (continued))

SRef.	Kafes Tipi	Malzeme	Araştırma Odağı	Metodoloji	Bulgular
[46]	Dört temel TPMS (schwarz gyroid, primitive, diamond, schoen ıwp) matris infiltrasyonlu IPC	316L paslanmaz çelik İskelet + polimerik dolgu (silikon ve epoksi)	Yarı-statik ve dinamik darbe	Deneysel / SEY	Polimer fazın şok dalgalarını metal yüzey etrafında mükemmel sönümlediği görülmüştür.
[47]	Kırılgan seramik plaka kafes iskelet tabanlı geçmeli fazlı kompozit (IPC)	Saf Al2O3 seramik iskelet + poliüre / AlSi10Mg alaşımı yumuşak faz dolgusu	Dinamik mekanik yanıt kıyaslaması	Deneysel	Yumuşak fazların kırılgan iskeletle uyumlu çalıştığı gösterilmiştir.
[48]	Doğrusal, silindirik ve küresel hibritleşme modelli 3D metamalzeme mimari (IPC)	VeroPureWhite (sert takviye fazı) + TangoBlack (kauçuk benzeri yumuşak faz)	Tasarım prensipleri	Analitik / SEY	Çok fazlı tasarımlar için mikromekanik teorik modeller geliştirilmiştir.
[49]	Kapalı hücreli plaka tabanlı SC, BCC ve FCC topolojili geçmeli fazlı kompozit (IPC)	316L paslanmaz çelik iskelet yapı + epoksi reçine matris	Akma dayanımı	Deneysel / SEY	IPC mimarisi sayesinde sönümleme verimliliğinde %215 artış sağlanmıştır.
[50]	Düğüm çatlamasını önleyici modifiye edilmiş periyodik ökzetik kafes yapı (hibrit)	Ti-6Al-4V metalik iskelet + yumuşak poliüretan elastomer infiltrasyonu	Kırılma hasarının ertelenmesi	Deneysel	Matrisin yarattığı hidrostatik basıncın çubuk burkulmasını geciktirdiği tespit edilmiştir.
[51]	Biyo-esinlenilmiş hücresel seramik plaka iskelet tabanlı çift fazlı yapı (dual-phase)	Saf alümina (Al2O3) seramik iskelet + hiperelastik poliüre dolgu	Tekrarlı darbe (cyclic)	Deneysel	Çift fazlı tasarımın yorulma direnci ve tekrarlı şok sönümlemesi sağladığı kanıtlanmıştır.

4. SONUÇLAR (CONCLUSION)

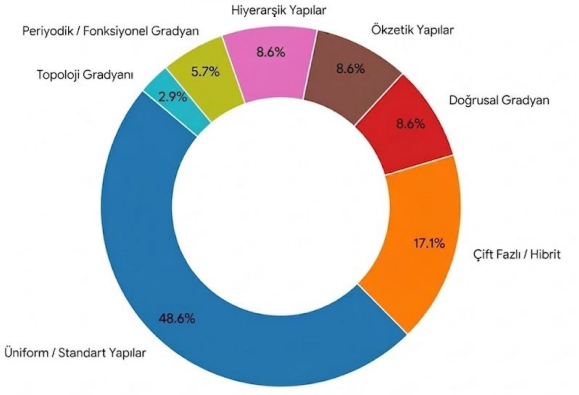
Bu çalışmada, FGKY'lerin enerji sönümleme performansını etkileyen tasarım parametreleri ve güncel araştırma eğilimleri sistematik olarak incelenmiştir. FGKY'ler ağırlık azaltımı ile birlikte yüksek hızlı darbe ve kuş çarpması gibi senaryolarda kritik bileşenlerin korunması amacıyla havacılık ve uzay alanında, çarpışma kutuları ve tampon sistemlerinde ani darbe enerjisinin sönümlenerek yolcu güvenliğinin sağlanması amacıyla otomotiv sektöründe, kemik implantlarında elastik modül uyumu ve gözenekli yapı sayesinde doku büyümesinin teşvik edilmesi amacıyla biyomedikal sektöründe ve balistik koruma ile kask gibi kişisel koruyucu donanımların sönümleme kapasitesinin artırılması amacıyla savunma sektöründe kendisine yer bulabilmektedir [12, 25, 33]. Katmanlı imalat yöntemlerinin gelişmesi ile birlikte özellikle son 15 yıl incelendiğinde FGKY'ler ile gerçekleştirilen çalışmalarda SLM yönteminde Ti-6Al-4V ve AlSi10Mg, FDM, MJ ve SLS yönteminde ise PA11, PA12 ve PLA polimerik malzemelerin kullanıldığı belirlenmiştir (Şekil 29). Metalik malzemelerde Ti-6Al-4V malzemesi baskın bir şekilde araştırmalara konu olurken [12, 14, 22, 25], son zamanlarda epoksi reçine gibi matris malzemelerin yapılara dahil edilmesi ile oluşan IPC yapılar [45, 46, 49, 50] da araştırılmıştır.



Şekil 28. Araştırmalara konu olan malzeme türleri (Figure 29. Material types investigated in the studies)

Araştırmalarda gradyan stratejilerinin etkisi değerlendirildiğinde, fonksiyonel gradyan tasarımı (yoğunluk, topoloji veya hücre boyutu değişimi), üniform yapılara kıyasla SEA kapasitesini %170'lere varan oranlarda artırabilmektedir [20]. Özellikle periyodik fonksiyonel gradyanların, doğrusal gradyanlara göre daha kararlı bir çökme mekanizması sunduğu çalışmalarda belirtilmiştir [16, 24, 19]. Topoloji ve deformasyon mekanizmalarına göre BCC gibi kiriş tabanlı yapılar, üretim kolaylığı ve öngörülebilir deformasyon modları nedeniyle yaygın olarak tercih edilse de elmas ve gyroid gibi yüzey tabanlı (TPMS) yapıların, daha yüksek mukavemet/ağırlık oranı ve pürüzsüz gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri sunduğu belirtilmiştir [20, 26, 31, 34, 42]. Enerji sönümleme verimliliği açısından gradyan yapıların kademeli çökme özelliği, tepe kuvvetini sınırlandırırken, plato bölgesini genişletmekte ve bu durum sönümleme verimliliğini optimize etmektedir. Ayrıca hibrit (polimer-metal) veya fazlı kompozit yapılar kullanıldığında, enerji sönümleme verimliliğinin %215'e kadar yükseldiği bildirilmiştir [18, 24, 32, 49]. Çalışmaların birçoğunda üniform kafes geometriler üretilmiş ve bunlar geliştirilen kafes geometriler ile kıyaslanmıştır. Tekil birim hücrelerin boyutsal gradyanları üzerine birçok çalışma yer alırken topoloji gradyanı üzerine çalışmalara yönelik yeterli araştırmanın yapılmadığı belirlenmiştir. Aynı zamanda, iskelet yapılara reçine veya metal matris entegre edilerek oluşturulan çift fazlı (dual phase) kompozitleri inceleyen araştırmalarda son yıllarda belirgin bir artış gözlemlenmiştir [46, 47, 48, 49, 50, 51]. Çalışmalarda yer alan gradyan stratejileri Şekil 30'da verilmiştir. Birçok araştırmada, geliştirilen yenilikçi yapılar referans olarak üniform BCC yapılarla kıyaslanmıştır. Bu nedenle literatürün büyük çoğunluğunda üniform BCC yapılar incelenmiştir.

Araştırmalar, 2000'li yılların başında daha çok geleneksel kafes yapıların statik mekanik davranışlarını anlamaya odaklanmıştır [11]. 2001 yılında Wallach ve Gibson tarafından yapılan öncü çalışmalar, üç boyutlu kafes geometrilerinin elastik modül ve mukavemet değerlerini teorik olarak formüle etmiştir [11]. Bu dönemde çalışmalar genellikle homojen yapılar üzerinde yoğunlaşmış ve sandviç paneller için çekirdek malzemesi geliştirme amacı taşımıştır. Katmanlı imalat teknolojilerinin (SLM, EBM, SLS) gelişmesiyle, karmaşık geometrilerin üretilebilirliği araştırmaların yönünü değiştirmiştir.



Şekil 29. Gradyan stratejileri (Figure 30. Gradient strategies)

2016-2017 yıllarında, Ti-6Al-4V gibi metallerle üretilen kafes yapıların darbe ve enerji sönümleme karakteristikleri incelenmeye başlanmış, Kagome ve BCC gibi birim hücrelerin performansları karşılaştırılmıştır [13, 14]. 2018-2019 döneminde, araştırmalar sadece statik yüklerle sınırlı kalmayıp dinamik (darbe) yüklere ve düşük hızlı çarpışma testlerine kaymıştır. Bu yıllarda kafes yapıların ince cidarlı borularla doldurularak hibrit sistemler oluşturulması fikri literatüre girmiştir [28, 43]. İlerleyen dönemlerde fonksiyonel gradyan kavramı derinleşmiş ve sadece yoğunluk değişimiyle sınırlı kalmamıştır. 2020 yılında, Bai ve arkadaşları gradyanlı yapılar için güç yasası gibi matematiksel modeller geliştirmiştir [16]. Negatif Poisson oranına sahip ökzetik yapılar (re-entrant, kiral vb.) ve bunların büyük plastik deformasyon altındaki davranışları aynı yıl içerisinde kapsamlı bir şekilde incelenmiştir [35]. 2021-2022 yıllarında, doğadan esinlenen (biyonik) tasarımlar ve dairesel/hiyerarşik hücre modelleri (HCirC) gibi daha karmaşık topolojiler önerilmiştir [19, 20]. 2023 yılından günümüze kadar olan dönemde yapıyı tek bir yönde değil, radyal ve eksenel gibi çok yönlü olarak derecelendirmeye odaklanılmıştır. Ayrıca kafes iskeletlerin poliüretan, epoksi veya metal fazlarla infiltre edildiği geçmeli fazlı kompozitlerin enerji sönümleme verimliliğini incelemek amacıyla

çalışmalar gerçekleştirilmiştir [45-50]. Sadece çubuk çapını değil, topolojiyi de gradyanlı hale getirerek deformasyon modellerini kontrol eden çalışmalara da yer verilmiştir. Seyedkazemi ve arkadaşlarının çalışmalarıyla, viskoelastik malzemeler ile ökzetik yapıların birleştirildiği akıllı sönümleme sistemleri öne çıkmıştır [39].

Literatürdeki eğilimler incelendiğinde, araştırmaların artık makine öğrenmesi algoritmaları ile hücre morfolojilerini tanımlamaya ve seramik plaka kafesler gibi ekstrem malzeme gruplarına evrildiği değerlendirilmektedir. Özellikle en güncel çalışmaların, poliüre ve alüminyum alaşımlı yumuşak fazların seramik iskeletlerle hibritlenmesi gibi çok disiplinli ve dinamik mekanik yanıt analizlerine odaklandığı görülmektedir. Ayrıca, mevcut çalışmaların büyük ölçüde statik testlere odaklandığı; düşük hızlı darbe ve yüksek hızlı dinamik yüklerin çok malzemeli hibrit sistemler üzerindeki etkilerine ilişkin araştırmaların sınırlı kaldığı ve bu alanda daha kapsamlı incelemelere ihtiyaç duyulduğu görülmektedir. Bu bağlamda, kafes yapıların elastomerik malzemelerle doldurulmasıyla elde edilen çift fazlı sistemler, sönümleme kapasitesinin artırılması açısından gelecek vadeden bir yaklaşım olarak öne çıkmaktadır.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazarı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

The author of this article declares that the materials and methods they use in their work do not require ethical committee approval and/or legal-specific permission.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

İlkay Günel: Makaleleri derlemiş, analiz etmiş ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

Collected and analyzed the articles and carried out the writing of the paper.

Prof. Dr. Ömer KELEŞ: Makaleleri incelemiş, görüş ve öneriler vererek yönlendirmiştir. Reviewed the articles and provided opinions and suggestions for guidance.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

There is no conflict of interest in this study.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

[1] Sunay, N., & Turgut, E. T. (2024). Eklemeli imalat teknolojilerinin havacılık sektöründe enerji verimliliğini artırma ve emisyon azaltma potansiyeli. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji, 12(2), 548-566. https://doi.org/10.29109/gujsc.1437824

[2] Nian, Y., Wan, S., Zhou, P., Wang, X., Santiago, R., & Li, M. (2021). Energy absorption characteristics of functionally graded polymer-based lattice structures filled aluminum tubes under transverse impact loading. Materials & Design, 209, 110011. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.110011

[3] Kaya, N. N., & Eldem, C. (2024). Özgün bir latis yapı tasarımının auxetic davranışının incelenmesi. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji, 12(2), 771-781. https://doi.org/10.29109/gujsc.1486707

[4] Zhu, G., Xu, F., Wang, X., Zhang, X., & Li, J. (2025). Mechanical performance of graded lattice structures with periodic density variations fabricated by selective laser melting. Materials & Design, 254, 114100. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2025.114100

[5] Avcı, M., & Keleş, Ö. (2025). Kaplamalı kafes yapıların enerji sönümleme incelemesi. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji, 13(4), 1843-1862. https://doi.org/10.29109/gujsc.1735561

[6] Wikipedia. Crystal structure, 2021. http://en.wikipedia.org/wiki/Crystal_structure

[7] Science Photo Library. Bone tissue: Animated coloured scanning electron micrograph (SEM) of cancellous (spongy) bone, dissolve.com, 2021. https://dissolve.com/video/Bone-tissue-Animated-coloured-scanning-electron-micrograph-rights-managed-stock-video-footage/002-D30-33-213

[8] Steve Gschmeissner. Nasturtium stem: Coloured scanning electron micrograph (SEM) of a freeze-fractured Nasturtium, Science Photo Library, 2021. https://

www.sciencephot-o.com/media/ 203278/view

[9] Richard Schiffman. How neglecting bees could endanger humans, salon.com, 2013. https://www.salon.com/2013/05/01/follow _europes_lead_in_protecting_ bees

[10] Daynes, S., & Feih, S. (2025). Functionally graded lattice structures with tailored stiffness and energy absorption. International Journal of Mechanical Sciences, 285, 109861. https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2024.10 9861

[11] Wallach, J. C., & Gibson, L. J. (2001). Mechanical behavior of a three-dimensional truss material. International Journal of Solids and Structures, 38(40-41), 7181-7196. https://doi.org/10.1016/S0020-7683(00)00400-5

[12] Li, S., Zhao, S., Hou, W., Teng, C., Hao, Y., Li, Y., Yang, R., & Misra, R. D. K. (2016). Functionally graded Ti-6Al-4V meshes with high strength and energy absorption. Advanced Engineering Materials, 18(1), 34–38. https://doi.org/10.1002/adem.201500086

[13] Ullah, I., Brandt, M., & Feih, S. (2016). Failure and energy absorption characteristics of advanced 3D truss core structures. Materials & Design, 92, 937-948. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.12.058

[14] Choy, S. Y., Sun, C.-N., Leong, K. F., & Wei, J. (2017). Compressive properties of functionally graded lattice structures manufactured by selective laser melting. Materials & Design, 131, 112-120

[15] Habib, F. N., Iovenitti, P., Masood, S. H., & Nikzad, M. (2018). Fabrication of polymeric lattice structures for optimum energy absorption using multi jet fusion technology. Materials & Design, 155, 86–98. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.05.059

[16] Bai, L., Gong, C., Chen, X., Sun, Y., Xin, L., Pu, H., Peng, Y., & Luo, J. (2020). Mechanical properties and energy absorption capabilities of functionally graded lattice structures: Experiments and simulations. International Journal of Mechanical Sciences, 182, 105735. https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2020.105735

[17] Hailu, Y. M., Nazir, A., Lin, S.-C., & Jeng, J.-Y. (2021). The Effect of functional gradient material distribution and patterning on torsional properties of lattice structures manufactured using multiJet fusion technology. Materials, 14(21), 6521. https://doi.org/10.3390/ma14216521

[18] Rodrigo, C., Xu, S., Durandet, Y., Fraser, D., & Ruan, D. (2021). Crushing behavior of functionally graded lattice. JOM, 73, 4130–4140. https://doi.org/10.1007/s11837-021-04946-x

[19] Wang, M., Zhang, J., & Wang, W. (2022). Compression and deformation behaviors of hierarchical circular-cell lattice structure with enhanced mechanical properties and energy absorption capacity. aerospace, 9(12), 786. https://doi.org/10.3390/aerospace9120786

[20] Gao, F., Zeng, Q., Wang, J., Liu, Z., & Liang, J. (2022). Compressive properties and energy absorption of BCC lattice structures with bio-inspired gradient design. Acta Mechanica Sinica, 38, 421345. https://doi.org/10.1007/s10409-021-09013-3

[21] K. Ushijima, W. J. Cantwell, R. Mines, S. Tsopanos, and M. Smith, An investigation into the compressive properties of stainless steel micro-lattice structures, Jnl Sandwich Struct. Mater. 13, 303 (2011). https://doi.org/10.1177/1099636210380997

[22] Li, P., Ma, Y. E., Sun, W., Qian, X., Zhang, W., & Wang, Z. (2022). Mechanical behaviors and failure modes of additive manufactured Ti6Al4V lattice structures under compressive load. Thin-Walled Structures, 180, 109778. https://doi.org/10.1016/j.tws.2022.109778

[23] Coluccia, A., Jiang, G., Meyer, G., De Pasquale, G., & Mittelstedt, C. (2023). Nonlinear static and dynamic modeling of

energy absorption lattice structures behavior. Mechanics of Advanced Materials and Structures, 30(14), 2838-2849. https://doi.org/10.1080/15376494.2022.2064016

[24] Rodrigo, C., Xu, S., Durandet, Y., Tran, P., & Ruan, D. (2023). Mechanical response of functionally graded lattices with different density grading strategies. Thin-Walled Structures, 192, 111132. https://doi.org/10.1016/j.tws.2023.111132

[25] Noronha, J., Dash, J., Leary, M., Watson, M., Qian, M., Kyriakou, E., & Brandt, M. (2023). Additively manufactured functionally graded lattices: Design, mechanical response, deformation behavior, applications, and insights. JOM, 75(12), 5729–5754. https://doi.org/10.1007/s11837-023-06190-x

[26] Lin, Y., Shi, W., Sun, X., Liu, S., Li, J., Zhou, Y., & Han, Y. (2023). Influence of density gradient on the compression of functionally graded BCC lattice structure. Materials, 16(2), 520. https://doi.org/10.3390/ma16020520

[27] Zhang, Q., Li, B., Zhou, S., Luo, M., Han, F., Chai, C., Wang, J., & Yang, X. (2024). Superior energy absorption characteristics of additively-manufactured hollow-walled lattices. International Journal of Mechanical Sciences, 264, 108834. https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2023.108834

[28] Ling, C., Cernicchi, A., Gilchrist, M. D., & Cardiff, P. (2019). Mechanical behaviour of additively-manufactured polymeric octet-truss lattice structures under quasi-static and dynamic compressive loading. Materials & Design, 162, 106–118. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.11.035

[29] Mueller, J., Matlack, K. H., Shea, K., & Daraio, C. (2019). Energy absorption properties of periodic and stochastic 3D lattice materials. Advanced Theory https://doi.org/ 10.1002/adts.201900081

[30] Pizzorni, M., Lertora, E., & Mandolfino, C. (2023). Energy absorption properties of a 3D-printed lattice-core foam composite under compressive and low-velocity impact loading. Materials Today Communications, 36, 106918. https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.106918

[31] Yin, H., Zhang, W., Zhu, L., Meng, F., Liu, J., & Wen, G. (2023). Review on lattice structures for energy absorption properties. Composite Structures, 304, 116397. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2022.116397

[32] Rodrigo, C., Xu, S., Durandet, Y., Fraser, D., & Ruan, D. (2023). Quasi-static and dynamic compression of additively manufactured functionally graded lattices: Experiments and simulations. Engineering Structures, 284, 115909. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.115909

[33] Chen, D., Gao, K., Yang, J., & Zhang, L. (2023). Functionally graded porous structures: Analyses, performances, and applications-A Review. Thin-Walled Structures, 191, 111046. https://doi.org/10.1016/j.tws.2023.111046

[34] Iacolino, G., Catalanotti, G., Mantegna, G., González, E. V., & Alaimo, A. (2025). A preliminary experimental evaluation of energy absorption capabilities of BCC and WBCC lattice structures manufactured via 3D Printing. Materials, 18, 4574. https://doi.org/10.3390/ma18194574

[35] Zhang, J., Lu, G., & You, Z. (2020). Large deformation and energy absorption of additively manufactured auxetic materials and structures: A review. Composites Part B: Engineering, 201, 108340. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.108340

[36] Al Hassanieh, S., Alhantoobi, A., Khan, K. A., & Khan, M. A. (2021). Mechanical properties and energy absorption characteristics of additively manufactured lightweight novel re-entrant plate-based lattice structures. Polymers, 13(22), 3882. https://doi.org/10.3390/polym13223882

[37] Choudhry, N. K., Panda, B., & Kumar, S. (2022). In-plane energy absorption characteristics of a modified re-entrant auxetic structure fabricated via 3D printing. Composites Part B: Engineering,

228, 109437. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.109437

[38] Top, N., Şahin, İ., & Gökçe, H. (2023). The Mechanical properties of functionally graded lattice structures derived using computer-aided design for additive manufacturing. Applied Sciences, 13(21), 11667. https://doi.org/10.3390/app132111667

[39] Seyedkazemi, M., Wenqi, H., Jing, G., Ahmadi, P., & Khajehdezfuly, A. (2024). Auxetic structures with viscoelastic behavior: A review of mechanisms, simulation, and future perspectives. Structures, 70, 107610. https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.107610

[40] Zhang, H., Hu, D., Peng, H., Yuan, W., & Yang, Z. (2024). In-plane crushing behavior and energy absorption of sponge-inspired lattice structures. International Journal of Mechanical Sciences, 274, 109328. https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2024.109328

[41] Desole, M. P., Gisario, A., & Barletta, M. (2024). Energy absorption of PLA-based metamaterials manufactured by material extrusion: dynamic loads and shape recovery. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 132, 1697-1722. https://doi.org/10.1007/s00170-024-13430-0

[42] Kladovasilakis, N., Charalampous, P., Tsongas, K., Kostavelis, I., Tzetzis, D., & Tzovaras, D. (2021). Experimental and computational investigation of lattice sandwich structures constructed by additive manufacturing technologies. Journal of Manufacturing and Materials Processing, 5(3), 95. https://doi.org/10.3390/jmmp5030095

[43] Cetin, E., & Baykasoğlu, C. (2019). Energy absorption of thin-walled tubes enhanced by lattice structures. International Journal of Mechanical Sciences, 157-158, 471-484. https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2019.04.049

[44] Tolochyna, O., Zgalat-Lozynska, N., Podrezov, Y., Verbylo, D., Tolochyn, O., & Zgalat-Lozynskyy, O. (2023). The role of flexible polymer composite materials properties in energy absorption of three-dimensional auxetic lattice structures. Materials Today Communications, 37, 107370. https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.107370

[45] Al-Areqi, A. M., Aloyaydi, B., Subbarayan, S., & Al-Mufadi, F. A. (2024). Impact behavior of PLA/Epoxy/MGFs composite structure. Materials Today Communications, 39, 109264. https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2024.109264

[46] Novak, N., Al-Ketan, O., Mauko, A., Krstulović-Opara, L., Tanaka, S., Borovinšek, M., Vihar, B., Maver, U., Hokamoto, K., Vesenjak, M., & Ren, Z. (2025). Quasi-static and impact behaviour of polymer-metal

[47] Gao, X., Zhang, B., Wang, W., & He, R. (2026). Dynamic mechanical response of ceramic plate lattice and its interpenetrating phase composites: A comparative study based on polyurea and aluminum alloy soft phases. Journal of Alloys and Compounds, 1051, 186033. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2026.186033

[48] Mehraj, H., Singh, A., Peroni, M., & Karathanasopoulos, N. (2025). 3D-hybrid architected materials and interpenetrating phase composites: Design and mechanics. Thin-Walled Structures, 217, 113855. https://doi.org/10.1016/j.tws.2025.113855

[49] Wang, X., Song, B., Zhu, H., Zhang, Z., Zhang, L., & Shi, Y. (2025). Additively manufactured plate lattice interpenetrating composites with high yield strength and energy absorbing capability. Composite Structures, 353, 118709. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2024.118709

[50] Albertini, F., Dirrenberger, J., Sollogoub, C., Molotnikov, A., Adrien, J., & Maire, E. (2025). Hybrid auxetics: Postponing failure with elastomer infiltration of Ti-6Al-4V lattices. International Journal of

Mechanical Sciences, 306, 110704. https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2025.110704

[51] Zhang, X., Meng, Q., Zhang, K., Zhu, R., Qu, Z., Li, Y., & He, R. (2023). 3D-printed bioinspired Al2O3/polyurea dual-phase architecture with high robustness, energy absorption, and cyclic life. Chemical Engineering Journal, 463, 142378. https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.142378