

**T.C.
MANİSA CELAL BAYAR ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**



**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MEKANİK ANABİLİM DALI**

**Eklemeli İmalat ile Üretilmiş Sandviç Kompozit Kirişlerin
Mekanik Analizi**

MUTTALİP ESAD YAVUZ

**Danışman
Dr. Öğr. Üyesi Uğur ÖZMEN**

MANİSA-2025

**M.
ESAD
YAVUZ**

**Eklmeli İmalat ile Üretilmiş Sandviç Kompozit Kirişlerin
Mekanik Analizi**

2025

TAAHHÜTNAME

Bu tezin Manisa Celal Bayar Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Mekanik Ana Bilim Dalında akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını ve kullanılan tüm literatür bilgilerinin referans gösterilerek tezde yer aldığını, tamamen kendi çalışmam olduğunu, her alıntıya kaynak gösterdiğimi, tezin yazımında akademik ve etik kurallara aykırı herhangi bir yapay zeka ve program kullanmadığımı beyan ederim.

Muttalip Esad Yavuz



ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

Eklemeli İmalat İle Üretilmiş Sandviç Kompozit Kirişlerin Mekanik Analizi

Muttalip Esad YAVUZ

Manisa Celal Bayar Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Mekanik Anabilim Dalı

Danışman:
Dr. Öğr. Üyesi Uğur Özmen

Bu tez çalışmasında kompozit sandviç yapılarda çekirdek geometrisinin mekanik özellikler üzerindeki etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Çalışmanın temel amacı, farklı çekirdek geometrilerinin (dolu, kare, ince uzun, üçgen, bal peteği, re-entrant, arc re-entrant ve yıldız biçimli) eğme ve darbe dayanımları üzerindeki etkilerini karşılaştırmalı olarak ortaya koymaktır. Bu amaçla, karbon fiber takviyeli epoksi esaslı kabuk malzeme ile termoplastik poliüretan (TPU) çekirdek kullanılarak hibrit sandviç yapılar üretilmiştir. Kabuk yapısı Vakum Destekli Reçine İnfüzyon Metodu (VARIM) ile, çekirdek yapısı ise Eklemeli İmalat (FDM) teknolojisi ile üretilmiş ve iki bileşen yapıştırma yöntemiyle birleştirilmiştir.

Yapıların mekanik performansları üç nokta eğme testi (ASTM D790) ve çentiksiz Charpy darbe testi (ASTM D6110) kullanılarak değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, üçgensel çekirdek geometrisinin 50,8 MPa eğme mukavemeti, 1,60 GPa eğme modülü ve 25,1 kJ/m² darbe dayanımı ile en yüksek performansı sergilediğini göstermiştir. Bal peteği yapı, düşük kütleline rağmen yüksek özgül dayanım sunmuştur. Auxetic karakterli re-entrant ve arc re-entrant geometriler ise orta-yüksek rijitlik düzeyinde deformasyon kontrollü enerji yutma davranışı göstermiştir. Yıldız biçimli ve ince-uzun geometriler nispeten düşük dayanım ve yüksek deformasyon eğilimleri ile dikkat çekmiştir.

Bu çalışma, farklı çekirdek geometrilerinin aynı üretim ve test koşulları altında sistematik olarak karşılaştırıldığı nadir araştırmalardan biri olup hibrit üretim yönteminin (VARIM + FDM) kompozit yapı tasarımındaki potansiyelini göstermektedir. Elde edilen bulgular, özellikle hafiflik-rijitlik-tokluk dengesi arayan havacılık, otomotiv ve yapı sektörleri için önemli mühendislik verileri sunmaktadır. Sonuç olarak, çekirdek geometrisinin malzeme performansı üzerindeki belirleyici rolü deneysel olarak doğrulanmış ve kompozit sandviç yapıların optimizasyonu için yeni bir tasarım perspektifi kazandırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Kompozit sandviç yapılar, Çekirdek geometrisi, Hücresel yapılar, Eğme mukavemeti, Eğme modülü, Darbe dayanımı, Enerji absorpsiyonu, Auxetic yapı, Eklemeli imalat (FDM), Vakum destekli reçine infüzyon (VARIM).

2025, 68 sayfa

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

Mechanical Analysis of Sandwich Composite Beams Produced by Additive Manufacturing

Muttalip Esad Yavuz

**Manisa Celal Bayar University
Graduate School of Education
Department of Mechanical**

**Supervisor:
Asst. Prof. Dr. Ugur OZMEN**

In this thesis, the effect of core geometry on the mechanical properties of composite sandwich structures was experimentally investigated. The main objective of the study was to comparatively evaluate the influence of different core geometries (solid, square, slender, triangular, honeycomb, re-entrant, arc re-entrant, and star-shaped) on bending and impact performance. For this purpose, hybrid sandwich structures were fabricated using carbon fiber-reinforced epoxy skins and thermoplastic polyurethane (TPU) cores. The skins were produced by the Vacuum-Assisted Resin Infusion Method (VARIM), while the cores were fabricated by Additive Manufacturing (Fused Deposition Modeling, FDM), and both components were bonded using an adhesive process.

Mechanical performance was assessed through three-point bending tests (ASTM D790) and un-notched Charpy impact tests (ASTM D6110). The results revealed that the triangular core exhibited the highest overall performance with a bending strength of 50.8 MPa, a flexural modulus of 1.60 GPa, and an impact toughness of 25.1 kJ/m². The honeycomb structure offered high specific strength despite its low mass, while the auxetic re-entrant and arc re-entrant geometries showed controlled deformation and energy absorption behavior at medium-high stiffness levels. Star-shaped and slender geometries displayed lower strength and higher deformation tendencies.

This research stands out as one of the few systematic experimental comparisons of different core geometries produced under identical manufacturing and testing conditions, demonstrating the potential of hybrid production (VARIM + FDM) for advanced composite design. The findings provide valuable engineering insights for aerospace, automotive, and structural applications where a balance between lightweight, stiffness, and toughness is essential. Ultimately, the decisive role of core geometry in mechanical performance has been experimentally validated, offering a new design perspective for optimizing composite sandwich structures.

Keywords: Composite sandwich structures, Core geometry, Cellular structures, Flexural strength, Flexural modulus, Impact resistance, Energy absorption, Auxetic structure, Additive manufacturing (FDM), Vacuum-assisted resin infusion (VARIM).

2025, 68 pages

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Günümüzde gelişen teknoloji ve mühendislik yaklaşımları, daha hafif, dayanıklı ve enerji açısından verimli malzemelerin tasarımını zorunlu kılmıştır. Bu doğrultuda kompozit sandviç yapılar; yüksek özgül dayanımları, geometrik esneklikleri ve çok yönlü uygulama potansiyelleri sayesinde modern endüstrilerde önemli bir yer edinmiştir. Bu tez çalışması, kompozit malzemelerde **çekirdek geometrisinin mekanik davranışlar üzerindeki etkisini** deneysel olarak inceleyerek, bu alandaki bilgi birikimine katkıda bulunmayı amaçlamaktadır.

Çalışma boyunca farklı çekirdek geometrilerine sahip kompozit panellerin üretimi, test edilmesi ve sonuçlarının analiz edilmesi büyük bir titizlikle yürütülmüştür. Bu süreç, yalnızca teknik bilgi üretimi açısından değil, aynı zamanda araştırma disiplini, sabır ve analitik düşünme becerilerinin gelişimi açısından da son derece öğretici olmuştur. Elde edilen sonuçlar, sandviç yapı tasarımlarında geometrinin performans üzerindeki belirleyici etkisini ortaya koymuş ve mühendislik uygulamaları için yeni bir perspektif kazandırmıştır.

Bu çalışma, akademik olarak olduğu kadar kişisel olarak da önemli bir öğrenme ve gelişim sürecinin ürünüdür.

Bu tez çalışmasının planlanması, yürütülmesi ve tamamlanması sürecinde bilgi birikimi, tecrübesi ve rehberliğiyle bana yol gösteren danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Uğur Özmen'e en içten teşekkürlerimi sunarım. Kendisi, akademik yaklaşımı, titizliği ve sabrı ile bu çalışmanın yönünü şekillendirmiş ve araştırma sürecine değer katmıştır.

Hayatımın her aşamasında olduğu gibi bu zorlu süreçte de sabrı, anlayışı ve desteğiyle yanımda olan sevgili eşim Elif Yavuz'a sonsuz teşekkür ederim. Her zaman yanımda oluşu, motivasyonumu yüksek tutmamı sağlayan en önemli güç olmuştur.

Bu tez, bilimsel bir çalışmanın ötesinde; emek, sabır ve azmin bir sonucu olarak ortaya çıkmıştır.

Muttalip Esad YAVUZ
Manisa, 2025

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler Açıklama

Al_2O_3	Alümina
C	Karbon
D	Eğme Rijitliği
E	Elastisite Modülü
SiC	Silisyum Karbür
t^3	Kalınlık küpü
δ_{max}	Maksimum Yer Değiştirme
σ_{max}	Maksimum Eğme Dayanımı

Kısaltmalar Açıklama

CLT	Klasik Laminasyon Teorisi
FDM	Fused Deposition Modeling
g	Gram
GPa	GigaPascal
J	Joule
LCA	Yaşam Döngüsü Analizi
mm	Milimetre
MMK	Metal Matrisli Kompozitler
MPa	MegaPascal
PA	Poliamid
PEEK	Polietereterketon
PET	Polietilen Tereftalat
PMI	Polimetakrilimid
PMK	Polimer Matrisli Kompozitler
PP	Polipropilen
PU	Poliüretan
PVC	Polivinil Klorür
SEA	Sonlu Elemanlar Analizi
SMK	Seramik Matrisli Kompozitler
TPU	Termoplastik Polüretan
VARIM	Vakum Destekli Reçine İnfüzyon Metodu

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1.Numune parça kabuk üretimi	21
Şekil 2.2.CNC kesim makinası ile üretilen numunelerin kesimi	21
Şekil 2.3.Numune parça kabuk malzemesinin kesimi	22
Şekil 2.4.Dolu çekirdek yapısı CAD çizim görseli	24
Şekil 2.5.Üçgen çekirdek yapısı CAD çizim görseli	24
Şekil 2.6.Kare çekirdek yapısı CAD çizim görseli	25
Şekil 2.7.İnce Uzun çekirdek yapısı CAD çizim görseli	25
Şekil 2.8.Arc Reatrant çekirdek yapısı CAD çizim görseli	26
Şekil 2.9.Reatrant yapısı CAD çizim görseli	26
Şekil 2.10.Bal Peteği çekirdek yapısı CAD çizim görseli	27
Şekil 2.11.Yıldız çekirdek yapısı CAD çizim görseli	27
Şekil 2.12.Test aşamasına hazır parçalar	29
Şekil 2.13.AUTOGRAPH marka eğme test cihazı	31
Şekil 2.14.MITECH marka charpy darbe testi cihazı	33
Şekil 3.1.Eğilme Mukavemeti sonuçları	36
Şekil 3.2.Eğilme Modülü sonuçları	38
Şekil 3.3.Maksimum Yer Değiştirme sonuçları	40
Şekil 3.4.Kütle sonuçları	42
Şekil 3.5.Enerji sonuçları	44
Şekil 3.6.Darbe dayanımı sonuçları	45
Şekil 3.7.Eğilme Mukavemeti/Kütleye Göre Normalizasyon Yapılmış Versiyon	46
Şekil 3.8.Eğilme Modülü/Kütleye Göre Normalizasyon Yapılmış Versiyon	48
Şekil 3.9. Darbe Dayanımı/Kütleye Göre Normalizasyon Yapılmış Versiyon	49
Şekil 3.10.Kare çekirdek yapısı test öncesi ve sonrası	52
Şekil 3.11.İnce Uzun çekirdek yapısı test öncesi ve sonrası	53
Şekil 3.12.Üçgen çekirdek yapısı test öncesi ve sonrası	54
Şekil 3.13.Bal Peteği çekirdek yapısı test öncesi ve sonrası	55
Şekil 3.14.Re-entrant çekirdek yapısı test öncesi ve sonrası	56
Şekil 3.15.Arc Re-entrant çekirdek yapısı test öncesi ve sonrası	57
Şekil 3.16.Star-shaped çekirdek yapısı test öncesi ve sonrası	58
Şekil 3.17.Star-shaped çekirdek yapısı test öncesi ve sonrası	58
Şekil 3.18.Charpy darbe testi numune pozisyonu	59
Şekil 3.19. Charpy darbe testi çekiç pozisyonu	60

TABLÖLAR DİZİNİ

	Sayfa
Tablo 1.1. Darbe Özelliklerinin İncelendiği Çalışmalarda Kullanılan Malzemeler (Karsandik vd., 2023)	17
Tablo 1.2. Çekirdek Malzemesi olarak polimerlerin kullanıldığı çalışmalar (Grünwald vd., 2017)	18
Tablo 2.1. Karışımında kullanılan epoksi reçine ve sertleştirici teknik detayları	20
Tablo 2.2.3B Yazdırma Parametreleri	28
Tablo 3.1. Farklı geometrilerin mekanik test sonuçları	51

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	4
ABSTRACT	5
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR	6
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	7
ŞEKİLLER DİZİNİ	8
TABLolar DİZİNİ	9
İÇİNDEKİLER	10
GİRİŞ	11
1.GİRİŞ VE KOMPOZİT MALZEMELERİN TEMEL İLKELERİ	11
1.1. Kompozit Malzemelerin Tarihsel Gelişimi ve Stratejik Önemi	11
1.2. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması	12
1.2.1. Matris Türüne Göre Sınıflandırma	12
1.2.2. Takviye Türüne ve Yapısına Göre Sınıflandırma	13
1.3. Kompozit Malzemelerin Tasarım ve Optimizasyon İlkeleri	15
1.4. Kompozit Malzemelerin Çevresel Etkileri ve Sürdürülebilirlik	15
2.MALZEME VE METOD	19
2.1. Malzeme ve üretim yöntemi	19
2.1.1. Kabuk Malzeme	19
2.1.2. Çekirdek malzemesi	22
2.1.3. Numune üretimleri	28
2.2 Testler	29
2.2.1. Eğme Testi	29
2.2.2. Charpy Darbe testi	31
3.SONUÇLAR ve TARTIŞMA	34
3.1. Eğme Testi Sonuçları	34
3.2. Charpy Darbe Testi Sonuçları	42
3.3.Test Sonuçlarının Kütleye Göre Normalizasyonu	46
3.4. Test Sonuçlarının Tablosal Gösterimi	51
3.5. Test Aşamalarına Ait Fotoğraflar	52
4. SONUÇ ve DEĞERLENDİRME	61
5. KAYNAKLAR	64

1. GİRİŞ

1.1. Kompozit Malzemelerin Tarihsel Gelişimi ve Stratejik Önemi

Kompozit malzemeler, iki veya daha fazla birbirinden ayrı fiziksel veya kimyasal fazın, makro düzeyde birleştirilmesiyle oluşturulan ve tek başlarına sahip olamayacakları üstün mekanik ve fiziksel özelliklere sahip olan mühendislik malzemeleri olarak tanımlanmaktadır (Mallick, 2007). Bu malzemelerin temel dayanağı, farklı bileşenlerin sinerjik bir etki ile bir araya gelerek, belirli bir uygulama için performansın optimize edilmesidir. Tarihsel süreç incelendiğinde, kompozit kavramının insanlık tarihi kadar eski olduğu görülmektedir. Antik Mısır'da kerpiç tuğlaların yapımında çamur matrisine saman liflerinin karıştırılması veya doğal liflerle güçlendirilmiş kil kaplar, bu malzeme sınıfının bilinen en erken örneklerini oluşturmaktadır (Chawla, 2012).

Modern kompozitlerin endüstriyel anlamdaki kökeni ise 20. yüzyılın ortalarına dayanmaktadır. İkinci Dünya Savaşı döneminde, askeri gereksinimler doğrultusunda hafif ve mukavim malzemelere olan acil ihtiyaç, cam elyafının polimer reçineler ile sistematik olarak birleştirilmesine öncülük etmiştir. Bu dönemde, özellikle polyester reçine ile güçlendirilmiş cam elyafı, radar kubbeleri ve hafif tekne gövdeleri gibi uygulamalarda kullanılmaya başlanmıştır (Mazumdar, 2001).

Soğuk Savaş'ın ve uzay yarışının şekillendirdiği 1950'ler ve 1960'larda, havacılık ve uzay endüstrisinin sınırları zorlayan talepleri, cam elyafından daha yüksek spesifik mukavemet ve rijitlik sunan malzemelerin geliştirilmesini zorunlu kılmıştır. Bu baskı, karbon fiber ve aramid (Kevlar) gibi yüksek performanslı ileri fiberlerin keşfi ve ticarileşmesi ile sonuçlanmıştır. Bu malzemeler, uzay aracı komponentleri, uçak yapısal elemanları ve balistik koruma uygulamalarında vazgeçilmez bir konuma ulaşmıştır (Hull & Clyne, 1996).

1980'lerden itibaren, kompozitlerin kullanımı yüksek performanslı niş alanlardan, performansın maliyetten daha öncelikli olduğu ticari sektörlerle doğru genişlemiştir. Otomotiv endüstrisinde (spor araçlar, iç paneller), spor malzemelerinde (tenis raketleri, bisiklet gövdeleri) ve denizcilik sektöründe kabul görmeye başlamışlardır. 21. yüzyılın başlarında ise nanoteknoloji ve eklemeli imalat (3B baskı) gibi disiplinler arası teknolojiler, kompozit malzeme biliminde yeni bir çıkış açmıştır (Gibson, Rosen, & Stucker, 2010). Nano takviyeler, matris özelliklerini moleküler düzeyde iyileştirirken, eklemeli imalat ise geleneksel yöntemlerle üretilmesi imkansız olan karmaşık, hafif ve fonksiyonel yapıların üretimine olanak tanımıştır.

Günümüzde, kompozit malzemeler sürdürülebilir ve yüksek verimli teknolojilerin temel taşı haline gelmiştir. Örneğin, Boeing 787 ve Airbus A350 gibi yeni nesil ticari uçakların gövde ve kanat yapılarının %50'sinden fazlası karbon fiber takviyeli polimer kompozitlerden üretilmiş olup, bu durum yakıt verimliliğinde ve

menzilde kayda değer artışlar sağlamıştır (Soutis, 2005). Bunun yanı sıra, rüzgâr türbini kanatları, otomotiv gövde panelleri, yüksek hızlı tren ve gemi yapıları, tıbbi cihazlar ve biyomedikal implantlar kompozitlerin başlıca uygulama alanları arasında yerini korumaktadır.

1.2. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Kompozit malzemelerin sistematik bir şekilde sınıflandırılması, mühendislik tasarım sürecinde doğru malzeme seçimi için esastır. En yaygın sınıflandırma kriterleri, matrisin ve takviye elemanının türüne dayanmaktadır.

1.2.1. Matris Türüne Göre Sınıflandırma

Matris fazı, kompozitin sürekliliğini sağlamakta, takviye elemanlarını bir arada tutmakta, üzerine gelen yükü takviyelere aktarmakta ve çevresel etkenlere (nem, kimyasallar, aşınma) karşı koruma sağlamaktadır.

Polimer Matrisli Kompozitler (PMK): En yaygın ve ticari olarak erişilebilir kompozit grubudur. Matris malzemesi olarak termoset (epoksi, polyester, vinilester) veya termoplastik (Polipropilen -PP-, Poliamid -PA-, Polietereterketon -PEEK-) polimerler kullanılmaktadır.

Termoset PMK'ler: Epoksi reçineler, yüksek mekanik özellikleri, mükemmel fiber yapışması ve kimyasal direnci nedeniyle havacılık-uzay ve yüksek performanslı spor malzemelerinde altın standart olarak kabul edilir (Campbell, 2010). Ancak, bu malzemelerin geri dönüşüm süreçleri karmaşıktır ve belirli bir kırılma sergileyebilirler.

Termoplastik PMK'ler: PEEK gibi ileri mühendislik termoplastikleri, üstün tokluk, çarpma direnci ve yerinde kaynak yapılabilme kabiliyetleri ile öne çıkmaktadır. Ayrıca, eriyik işleme yöntemlerine uygunlukları ve geri dönüştürülebilirlikleri, onları sürdürülebilir üretim açısından gelecek vadeden bir seçenek haline getirmektedir.

Metal Matrisli Kompozitler (MMK): Geleneksel metallerin sıcaklık dayanımı, aşınma direnci ve spesifik rijitlik gibi özelliklerini iyileştirmek amacıyla geliştirilmişlerdir. Alüminyum, magnezyum ve titanyum alaşımları yaygın matris malzemeleridir. Takviye olarak genellikle silisyum karbür (SiC) veya alümina (Al_2O_3) partikülleri kullanılır. Uydu yapıları, havacılıkta piston ve silindir gibi ısı yüklemeye maruz kalan komponentlerde tercih edilirler. Yüksek üretim maliyetleri, kullanımlarını genellikle niş ve yüksek değerli uygulamalarla sınırlandırmaktadır (Kaczmar, Pietrzak, & Rusiński, 2000).

Seramik Matrisli Kompozitler (SMK): Seramiklerin yüksek sıcaklık ve aşınma dayanımını korurken, ani kırılma kırılma davranışlarını iyileştirmek için tasarlanmışlardır. Seramik fiberler (SiC, C) ile takviye edilmiş seramik matrislerden (SiC, Al_2O_3) oluşurlar. Bu malzemeler, gaz türbini bileşenleri, nükleer reaktör

parçaları ve uçak fren sistemleri gibi geleneksel malzemelerin sınırlarını zorlayan aşırı ortamlarda kullanılmaktadır (Naslain, 2004).

1.2.2. Takviye Türüne ve Yapısına Göre Sınıflandırma

Takviye fazı, kompozitin mekanik yük taşıma kapasitesinden ve rijitliğinden başlıca sorumlu olan bileşendir.

Fiber Takviyeli Kompozitler: Yüksek mukavemet/ağırlık oranları nedeniyle yapısal uygulamalarda en çok tercih edilen takviye türüdür.

Cam Elyaf: Ekonomik olarak erişilebilir olması, iyi korozyon direnci ve dengeli mekanik özellikleri ile genel amaçlı uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır.

Karbon Elyaf: Olağanüstü spesifik mukavemet ve rijitliğin yanı sıra mükemmel yorulma dayanımı sunar. Maliyetinin nispeten yüksek olması, kullanımını genellikle performansın kritik olduğu alanlarla sınırlandırmaktadır.

Aramid Elyaf (Kevlar): Yüksek çekme mukavemeti ve olağanüstü darbe/çarpma dayanımı ile karakterize edilir. Balistik yelekler, kesilmeye karşı koruyucu eldivenler ve basınçlı kaplar gibi uygulamalarda kullanılır.

Doğal Elyaf (Keten, Kenevir, Jüt): Sürdürülebilir, yenilenebilir, biyobozunur ve düşük yoğunluklu olmaları gibi çevresel avantajlar sunarlar. Otomotiv endüstrisinde iç trim panelleri gibi yarı-yapısal uygulamalarda kullanımları giderek artmaktadır (Faruk, Bledzki, Fink, & Sain, 2012).

Partikül Takviyeli Kompozitler: Bu tür kompozitlerde, takviye elemanları partikül veya kısa fiber formundadır ve matris içinde izotropik (yönden bağımsız) özellikler sergilerler. Seramik partiküller (Al_2O_3 , SiC) takviye olarak kullanılarak matrise aşınma dayanımı, sertlik ve yüksek sıcaklık stabilitesi kazandırılır.

Yapısal Kompozitler: Bu kategori, farklı malzeme katmanlarının veya yapıların bir araya getirilmesiyle oluşturulan kompozitleri kapsar.

Tabakalı Kompozitler (Laminatlar): Fiber takviyeli polimer tabakaların (laminalar), fiber yönelimleri kontrollü bir şekilde değiştirilerek, belirli yük koşulları için optimize edilmiş anizotropik (yöne bağlı) özellikler elde etmek amacıyla üst üste bindirilmesiyle üretilirler (Kaw, 2005).

Sandviç Kompozitler: İki ince, rijit ve yüksek mukavemetli dış yüzey (kabuk) arasına, nispeten kalın, hafif ve düşük yoğunluklu bir çekirdek malzemesinin yerleştirilmesiyle oluşturulurlar. Bu tasarım, çok hafif bir ağırlıkta son derece yüksek eğme rijitliği sağlamaktadır (Vinson, 1999). Uçak gövde panelleri, rüzgâr türbini kanatları ve yüksek performanslı tekne gövdelerinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Sandviç kompozitler, mühendislik tasarımında hafiflik-yüksek mukavemet optimizasyonunun en etkili örneklerinden birini teşkil etmektedir. Bu yapılar, temel olarak, iki ince, rijit ve yüksek mukavemetli dış yüzey arasına, nispeten kalın, hafif ve düşük yoğunluklu bir çekirdek malzemesinin yerleştirilmesiyle oluşturulur. Bu tasarım felsefesi, mekanikteki eğme rijitliğinin (D), kalınlığın küpü (t^3) ile orantılı olması prensibine dayanır. Dolayısıyla, merkezde nötr eksenini uzaklaştıran kalın bir çekirdek kullanmak, ağırlıkta çok az bir artışla, eğme ve burkulma dayanımında katlanmış bir iyileşme sağlar (Gibson, 2016).

Sandviç yapıya etki eden eğme momentleri, üst ve alt yüzeylerde birbirine zıt yönde çekme ve basma gerilmeleri oluşturur. Yüksek mukavemetli yüzeyler bu gerilmeleri karşılarken, ara malzeme olan çekirdek ise bu iki yüzeyi birbirinden uzak tutarak yapısal kalınlığı korur ve kesme yüklerini taşımakla görevlidir. Bu işlevsel iş bölümü, sandviç yapıları monolitik (tek parça) malzemelere kıyasla çok daha verimli kılar (Zenkert, 1997).

Çekirdek malzemesinin seçimi, sandviç kompozitin performansını doğrudan belirler. Başlıca çekirdek tipleri şunlardır:

Bal peteği Yapılar: Genellikle alüminyum, Nomex® (aramid kağıt) veya karbon fiberden üretilirler. Hücreli yapıları sayesinde çok düşük yoğunlukta olağanüstü yüksek spesifik rijitlik sunarlar. Havacılık ve uzay gibi en üst düzey performans gerektiren uygulamalarda yaygındır.

Polimerik Köpükler: PVC (Polivinil Klorür), PET (Polietilen Tereftalat), PMI (Polimetakrilimid) ve PU (Poliüretan) köpükler bu gruba girer. Sürekli ve homojen yapıları sayesinde karmaşık şekillere kolayca uyarlanabilirler ve darbe dayanımları yüksektir. PET köpükler, iyi mekanik özellikleri ve geri dönüştürülebilirlikleri nedeniyle son yıllarda önem kazanmıştır.

Ahşap Çekirdekler (Balsa): Doğal bir malzeme olan balsa, düşük yoğunluğu ve yüksek basma mukavemeti ile öne çıkar. Özellikle denizcilik ve bazı rüzgâr türbini uygulamalarında tercih edilmektedir.

Kabuk malzemesi olarak genellikle yüksek performanslı karbon veya cam fiber takviyeli epoksi kompozit laminatlar kullanılır. Yüzeyler ile çekirdek arasındaki bağlantının sağlamlığı kritik öneme sahiptir; zayıf bir yapışma, delaminasyon riski taşır. Bu nedenle, yapısal yapıştırıcıların seçimi ve uygulama prosesi sandviç kompozit üretiminde hayati bir aşamadır.

Sandviç kompozitler, sundukları avantajlar nedeniyle birçok stratejik sektörde vazgeçilmezdir:

Havacılık ve Uzay: Uçak gövde panelleri, kanatçıklar, zemin panelleri ve iç donanımda kullanılır. Yakıt verimliliğine doğrudan katkıda bulunan ağırlık tasarrufu sağlarlar.

Rüzgâr Enerjisi: Türbin kanatlarının uzunluklarının artmasıyla birlikte, kanat kökünde oluşan yüksek eğme momentlerine karşı koymak için sandviç yapılar standart hale gelmiştir.

Denizcilik: Yüksek performanslı tekne ve yat gövdelerinde, suya karşı dayanıklılık ve ağırlıktan tasarruf sağlarlar.

Taşımacılık: Karayolu ve demiryolu taşıtlarında, ağırlığın azaltılması ve enerji verimliliğinin artırılması amacıyla kullanım alanı bulmaktadır.

İnşaat: Geçici köprüler, taşıyıcı paneller ve enerji etkin bina bileşenlerinde hafif ve yalıtım özellikleri nedeniyle tercih edilirler.

Sandviç kompozitler, malzeme mühendisliğinin temel prensiplerini ustaca kullanan, hafiflik, rijitlik ve dayanımı bir arada sunan, bu nedenle de modern teknolojik uygulamaların temel yapı taşlarından biri olmaya devam eden üstün mühendislik yapılarıdır.

1.3 Kompozit Malzemelerin Tasarım ve Optimizasyon İlkeleri

Kompozit malzemelerin en önemli avantajı, performans gereksinimlerine göre özelliklerinin tasarlanabilmesidir. Bu süreç, geleneksel izotropik malzemelerden farklı olarak, mikromekanik ve makromekanik prensiplerin anlaşılmasını gerektirir. Mikromekanik analiz, fiber ve matrisin bireysel özelliklerinden laminanın efektif elastik modülü gibi makro özelliklerin tahmin edilmesine odaklanır. Karışımlar kuralı (Rule of Mixtures) yöntemi, bu tahmin için temel bir araç olarak yaygın şekilde kullanılmaktadır (Daniel & Ishai, 2006). Makromekanik seviyede ise, her bir laminanın homojen ve ortotropik kabul edilerek, gerilme-şekil değiştirme ilişkilerinin tanımlanması esastır. Bu bağlamda, klasik laminasyon teorisi (CLT), çok katmanlı kompozitlerin davranışını modellemek için kritik bir rol oynar.

Modern kompozit tasarımı, gelişmiş bilgisayar yazılımları olmadan düşünülemez. Sonlu elemanlar analizi (SEA), kompozit yapıların karmaşık yük koşulları altındaki davranışını simüle etmek için standart bir yöntem haline gelmiştir. Özellikle, Abaqus ve ANSYS gibi yazılımlar, kullanıcıların her bir laminanın yönelimini, kalınlığını ve malzemesini tanımlayarak sanal ortamda detaylı analizler yapmasına olanak tanır (Barbero, 2013). Daha ileri bir adım olan topoloji optimizasyonu ise, belirli tasarım uzayı, yükler ve sınır koşulları içinde rijitliği maksimize ederken veya ağırlığı minimize ederken malzemenin en verimli dağılımını bulmayı amaçlar. Bu dijital tasarım yaklaşımı, geleneksel yöntemlerle hayal edilmesi zor olan biyolojik yapılara benzer hafif ve rijit formların ortaya çıkmasını sağlamıştır (Sigmund & Maute, 2013).

1.4 Sandviç Kompozit Malzemelerin Karakterizasyonu

İki ince, rijit kabuk ile bu kabuklardan daha kalın ve düşük yoğunluklu bir çekirdek tabakadan oluşan sandviç kompozit yapılar, yüksek özgül eğilme rijitliği

(rijitlik/ağırlık) ve yüksek özgül mukavemet (mukavemet/ağırlık) oranları sayesinde günümüzde başta havacılık ve denizcilik endüstrileri olmak üzere birçok mühendislik uygulamasında tercih edilmektedir. Bu yapıların en önemli avantajı, minimum ağırlıkla yüksek yapısal dayanım sağlamalarıdır. Sandviç kompozitlerde kullanılan kabuk malzemeleri arasında alüminyum, çelik ve tabakalı fiber takviyeli polimer kompozitler yer alırken (Zhao vd., 2022), çekirdek malzemeleri genellikle köpük, bal peteği, oluklu veya kafes yapılı geometrilerden oluşmaktadır. Çekirdek türlerine göre sınıflandırıldığında; köpük çekirdekli sandviç yapılar (Fam ve Sharaf, 2010; Hassanpour Roudbenh vd., 2020; Russo ve Zuccarello, 2007; Sharaf ve Fam, 2013), bal peteği çekirdekli yapılar (Crupi vd., 2013; Han vd., 2020; Jen ve Chang, 2009; Nasution vd., 2015; Sturm vd., 2014; Z. Zhang vd., 2020), oluklu çekirdekli yapılar (Côté vd., 2006; Magnucka-Blandzi vd., 2015; Meng vd., 2020; Seong vd., 2010; Vaidya vd., 2015; J. Zhang vd., 2013) ve kafes çekirdekli yapılar (Cote vd., 2007; Lim ve Kang, 2006; Shi vd., 2018; Sugimura, 2004; L. Wang vd., 2019; Zhou vd., 2004) literatürde en yaygın karşılaşılan tasarım tipleridir.

Sandviç yapıların çekirdek bölgesinde kullanılan sünek malzemeler, yüksek şekil değiştirme kapasiteleri ve tokluk özellikleri sayesinde darbe dayanımı açısından önemli avantajlar sunmaktadır. Sünek malzemeler, deformasyon yetenekleri sayesinde darbe yükleri altında enerjiyi emerek yapının bütünlüğünü korur ve bu nedenle araştırmacıların son yıllarda artan ilgisini çekmiştir (Karsandik vd., 2023). Bu bağlamda, özellikle sandviç kompozitlerin darbe davranışlarının incelendiği çalışmalar literatürde öne çıkmaktadır. Son yıllarda yürütülen ve farklı kabuk–çekirdek kombinasyonlarının darbe performansını değerlendiren çalışmalardan bazıları Tablo 1’de özetlenmiştir.

Usta vd. (2021), özkatik (negatif Poisson oranına sahip) ve özkatik olmayan çekirdek yapıların, karbon fiber/epoksi (KFDP) kabuk malzeme ile oluşturulduğu sandviç kompozitlerde düşük hızlı darbe davranışlarını incelemiştir. Çekirdek yapılar, 3B yazıcı ile polilaktik asit (PLA) malzemeden üretilmiş ve farklı geometrik düzenlerin darbe tepkisine etkisi değerlendirilmiştir. Xie vd. (2020), alüminyum kabuk ve bal peteği biçiminde köpük çekirdek kullanarak, çekirdek yoğunluğunun darbe direnci üzerindeki etkisini araştırmış ve yoğunluk artışının sınırlı da olsa dayanımı artırdığını rapor etmiştir. Xue vd. (2019), çekirdek kalınlığının darbe davranışına etkisini incelemiş ve kalınlığın en büyük darbe kuvveti ile enerji absorpsiyonu üzerinde belirgin bir etkisinin olmadığını ortaya koymuştur. Wang vd. (2016), alüminyum kabuk ve balsa, polipropilen (PP) bal peteği gibi farklı çekirdek malzemeleri kullanarak orta hızlı darbe testleri gerçekleştirmiş ve malzeme türünün enerji absorpsiyonu üzerinde belirleyici rol oynadığını göstermiştir. Yang vd. (2015) karbon ve cam fiber takviyeli kabuk malzemelerin darbe tepkisine etkisini incelerken, Ugale vd. (2015) benzer malzemelerle farklı darbe enerjileri altında karşılaştırmalı analizler yürütmüştür. Crupi vd. (2012) ise alüminyum kabuk ve alüminyum bal peteği çekirdekli sandviç kompozitlerde hücre boyutlarının darbe dayanımına etkisini araştırmış ve küçük hücre boyutlarının enerji absorpsiyonunu artırdığını belirtmiştir.

Tablo 1.1.Darbe Özelliklerinin İncelendiği Çalışmalarda Kullanılan Malzemeler
(Karsandik vd., 2023)

	Kabuk Malzemesi	Çekirdek Malzemesi
(Y. Zhu ve Sun, 2021)	KFDP	PLA bal peteği
(Usta vd., 2021)	KFDP	PU Köpük
(Xie vd., 2020)	Alüminyum	Nomex bal peteği
(Xue vd., 2019)	CFDP - KFDP	Nomex bal peteği
(He vd., 2019)	KFDP	Alüminyum bal peteği
(Bai vd., 2019)	KFDP	PMI Köpük
(Aryal vd., 2019)	KFDP	Nomex bal peteği
(D. Zhang vd., 2017)	Alüminyum	Alüminyum bal peteği
(Chen vd., 2017)	KFDP	Nomex bal peteği
(T. Zhang vd., 2016)	KFDP	Nomex bal peteği
(H. Wang vd., 2016)	Alüminyum	Balsa ahşap/PP bal peteği/Köpük
(Yang vd., 2015)	CFDP - KFDP	PU Köpük
(J. Wang vd., 2015)	KFDP	Köpük
(Ugale vd., 2015)	CFDP - KFDP	Köpük
(Ivañez vd., 2015)	KFDP	Nomex bal peteği
(Akatay vd., 2015)	Alüminyum	Alüminyum bal peteği
(McQuigg vd., 2014)	CFDP	Nomex bal peteği
(Gordon vd., 2014)	CFDP	Köpük
(Gilioli vd., 2014)	Alüminyum	Nomex bal peteği
(G. Zhang vd., 2013)	KFDP	Alüminyum piramid kafes
(Feng ve Aymerich, 2013)	KFDP	Köpük
(Crupi vd., 2012)	Alüminyum	Alüminyum bal peteği
(Cho vd., 2013)	Alüminyum	Alüminyum bal peteği
(Tan ve Akil, 2012)	Alüminyum - CFDP	PP bal peteği
(Ma vd., 2012)	CFDP	Köpük
(Klaus vd., 2012)	KFDP	Nomex bal peteği
(Zinno vd., 2011)	CFDP	Nomex bal peteği
(S. Zhu ve Chai, 2011)	Akrilik	Nomex bal peteği
(Sawal ve Hazizan, 2011)	Alüminyum	PP bal peteği

KFDP: Karbon fiber destekli polimer, CFDP: Cam fiber destekli polimer, PP: Polipropilen

Termoplastik polimerler, düşük yoğunluk, yüksek darbe dayanımı, kolay şekillendirilebilirlik ve geri dönüştürülebilirlik gibi avantajları sayesinde yalnızca yapısal uygulamalarda değil, sandviç kompozit malzemelerde de yaygın biçimde kullanılmaktadır (Grünwald vd., 2017). Polipropilen (PP), poliamid (PA), polieterimid (PEI) ve polietereterketon (PEEK) gibi mühendislik termoplastikleri, hem saf halde hem de fiber takviyeli biçimlerde kabuk malzemesi olarak kullanılmaktadır. Ayrıca son yıllarda yapılan çalışmalar, bu malzemelerin çekirdek bileşeni olarak kullanımına da odaklanmıştır.

Polipropilen (PP), düşük üretim maliyeti, kolay temin edilebilirliği ve geri dönüştürülebilirliği sayesinde öne çıkmaktadır (Cabrera vd., 2008). Polimetakrilimid

(PMI) ise erimez yapısına rağmen 180 °C'ye kadar yüksek termal kararlılığı nedeniyle ilgi görmektedir (Åkermo ve Tomas Åström, 1998; Breuer vd., 1998; McGarva ve Åström, 1999). Polieterimid (PEI) polimeri, yüksek sıcaklıklarda çalışabilme özelliği, düşük yanıcılık ve toksisite (FST) performansı sayesinde sandviç kompozitlerin çekirdek bölgesinde geniş kullanım alanı bulmuştur. Bu çalışmalara ilişkin özet bilgiler Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 1.2.Çekirdek Malzemesi olarak polimerlerin kullanıldığı çalışmalar (Grünewald vd., 2017)

	Polimer	Yapı
(Cabrera vd., 2008; Passaro vd., 2004)	PP	Bal peteği
(Cabrera vd., 2008)	PP	Köpük
(Skawinski vd., 2004)	PP	Köpük
(Passaro vd., 2004)	PP	Köpük
(Åkermo ve Astrom, 1999)	PP	Köpük
(Pappadà vd., 2010)	PET	Köpük
(Breuer vd., 1998)	PA12	Bal peteği
(Åkermo ve Tomas Åström, 1998; Breuer vd., 1998; McGarva ve Åström, 1999; Trende ve Astrom, 2002)	PMI	
(OFFRINGA ve DAVIES, 1996)	Aramid/Fenolik	Bal peteği
(Rozant vd., 2001, t.y., 2000)	PEI	Köpük

*PP: Polipropilen, PET: Polietilentereftalat, PA12: Poliamid 12, PES: Polietersülfon, PEI: Polieterimid

Bu yüksek lisans tezinde, eklemeli imalat yöntemiyle üretilmiş farklı çekirdek geometrilerine sahip hibrit sandviç kompozit yapıların mekanik performansları deneysel olarak incelenmiştir. Çalışmanın temel amacı, karbon fiber takviyeli epoksi kabuk ve termoplastik poliüretan (TPU) çekirdek kombinasyonuna sahip kompozit kırımlerde, çekirdek geometrisinin eğme ve darbe dayanımı üzerindeki etkilerini sistematik olarak belirlemektir. Literatürde yer alan çalışmalar genellikle alüminyum veya köpük tabanlı çekirdeklerle sınırlı olup, aynı üretim koşulları altında farklı geometrilerin karşılaştırıldığı araştırmalar oldukça az sayıdadır. Bu tez çalışması, eklemeli imalat (FDM) teknolojisi ile üretilen yedi farklı hücresel çekirdek yapının (kare, ince-uzun, üçgen, bal peteği, re-entrant, arc re-entrant ve yıldız biçimli) performanslarını, tek bir üretim ve test sistemi içinde bütüncül biçimde değerlendirilerek mevcut literatüre özgün bir katkı sunmaktadır. Ayrıca, termoplastik çekirdek malzemelerin esneklik ve enerji absorpsiyon kabiliyetlerinden yararlanılarak hibrit üretim (VARIM + FDM) yaklaşımının kompozit yapı tasarımında uygulanabilirliği ortaya konmuştur. Bu yönüyle çalışma, hem sandviç yapılarda çekirdek morfolojisinin belirleyici etkisini deneysel olarak doğrulamakta hem de geleneksel metal veya köpük çekirdekli sistemlere alternatif, hafif ve darbe dayanımı yüksek bir çözüm yaklaşımı önermektedir.

2. MALZEME VE METOT

2.1. Malzeme ve üretim yöntemi

2.1.1. Kabuk Malzeme

Bu çalışmada kabuk yapısının üretiminde takviye elemanı olarak karbon elyaf, matris malzemesi olarak ise epoksi esaslı reçine tercih edilmiştir. Karbon elyaf, sahip olduğu yüksek çekme ve basma mukavemeti, düşük yoğunluğu ve üstün yorulma dayanımı sayesinde özellikle havacılık, uzay, otomotiv ve spor ekipmanları gibi ileri mühendislik uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Liflerin tek yönlü veya çok yönlü olarak belirli açılarla hizalanması, üretilen kompozit yapıların mekanik özelliklerini önemli ölçüde etkilemekte ve bu sayede yüksek taşıma kapasitesi ile rijitlik elde edilebilmektedir (Chand, 2000).

Epoksi reçineler ise yüksek yapışma kabiliyeti, kimyasal dayanıklılığı, boyutsal kararlılığı ve ısıya karşı dirençleri sayesinde kompozit malzemelerde matris fazı olarak sıklıkla tercih edilmektedir. Ayrıca epoksi reçineler, karbon elyaf ile yüksek düzeyde ara yüzey bağı oluşturarak gerilme transferini etkin şekilde gerçekleştirmekte ve yapısal bütünlüğü artırmaktadır (Liu et al., 2012). Bu özellikleri nedeniyle çalışmada epoksi reçine-karbon elyaf kombinasyonu tercih edilmiştir.

Çalışmada kullanılan kompozit plakalar, 1 mm kalınlığında, epoksi matriksli ve tek yönlü (0°) karbon elyaf takviyeli olacak şekilde hazırlanmıştır. Üretim işlemi, vakum infüzyon yöntemi kullanılarak (Şekil 2.1) aşağıdaki aşamalarla gerçekleştirilmiştir:

İlk olarak, vakumlama işleminin yapılacağı kalıp yüzeyi, üretim sırasında oluşabilecek kusurları önlemek amacıyla dikkatlice temizlenmiştir. Ardından reçinenin kalıp yüzeyine yapışmasını engellemek ve numunenin kalıptan kolaylıkla ayrılmasını sağlamak amacıyla yüzeye kalıp ayırıcı madde uygulanmıştır. Temizlik ve yüzey hazırlığı aşamalarının ardından, tek yönlü karbon kumaş katmanı düzgün bir şekilde kalıp yüzeyine yerleştirilmiştir. Bu katmanın üzerine sırasıyla soyulabilir kumaş, akış filesi, ve reçine giriş-çıkış hatları düzenli biçimde yerleştirilmiştir. Tüm katmanların üzerine vakum torbası kapatılmış, kenar kısımlar özel vakum macunu ile sızdırmaz hale getirilerek sistem hava geçirmez bir yapı haline getirilmiştir.

Vakum pompası kullanılarak sistemdeki hava tahliye edilmiş ve potansiyel sızıntıların olup olmadığı dikkatlice kontrol edilmiştir. Vakum sızdırmazlığının güvenilirliğini sağlamak amacıyla sistem yaklaşık 12 saat boyunca vakum altında bekletilmiştir. Reçine karışımı, %66 F1564 epoksi ve %34 F3486 sertleştirici oranında dikkatlice hazırlanmıştır. F1564 epoksi ve F3486 sertleştirici teknik verileri Tablo 2.1’de verilmiştir. Vakumun kararlı bir şekilde sürdüğü tespit edildikten sonra, oluşan negatif basınç sayesinde reçine elyaf katmanlarının içerisine homojen şekilde çekilmiştir. Reçinenin tüm elyaf boşluklarını eksiksiz doldurduğu süreç boyunca gözlemlenmiştir.

Reçine transferi işleminin tamamlanmasının ardından kompozit yapı, 60 °C sıcaklıkta 8 saat boyunca kürlenmeye bırakılmıştır. Kürlenme işlemi, reçine matrisin tam polimerizasyonunun sağlanması ve kompozit malzemenin nihai mekanik özelliklerini kazanması açısından kritik öneme sahiptir. Kürlenme süreci tamamlandıktan sonra elde edilen kompozit plakalardan, deneysel çalışmalarda kullanılacak numuneler hassas ölçülerde hazırlanmıştır. Kesim işlemleri, Manisa Celal Bayar Üniversitesi laboratuvar altyapısında bulunan CNC tezgâhında gerçekleştirilmiştir (Şekil 2.2).

Numune geometrileri, yapılacak mekanik testlerin türüne göre belirlenmiştir. Kiriş tipi numuneler 10 mm × 100 mm boyutlarında olacak şekilde üretilmiştir (Şekil 2.3). CNC kesim işlemi sırasında numune kenarlarının düzgünlüğüne ve yüzey kalitesine özel dikkat gösterilmiştir. Bu hazırlık süreci, yapılacak mekanik deneylerin güvenilirliği ve sonuçların tekrarlanabilirliği açısından büyük önem taşımaktadır.

Tablo 2.1.Karışımında kullanılan epoksi reçine ve sertleştirici teknik detayları

	F1564 - REÇİNE	F3486 - SERTLEŞTİRİCİ
Tür	Düşük viskoziteli, ılık kürlenmiş epoksi laminasyon reçinesi	Formüle amine esaslı sertleştirici. Düşük viskoziteli, uzun pota ömürlü
Görünüm / Renk	Şeffaf, Gardner 1-2	Renksiz – Açık sarı sıvı
Viskozite (25 °C)	1200-1400 mPa-s	10-20 mPa-s
Yoğunluk (25 °C)	1.10-1.20 g/cm ³	0.94-0.95 g/c
Alevlenme Noktası	≈ 185 °C	-
Önerilen Prosesler	RTM/infüzyon (SCRIM), ıslak serme, filament sarımı	-
Karışım Oranı	%34	%66



Şekil 2.1.Numune parça kabuk üretimi



Şekil 2.2. CNC kesim makinası ile üretilen numunelerin kesimi



Şekil 2.3. Numune parça kabuk malzemesinin kesimi

2.1.2. Çekirdek malzemesi

Bu çalışmada çekirdek yapının üretiminde malzeme olarak Termoplastik Poliüretan (TPU) tercih edilmiştir. TPU, esneklik, yüksek darbe dayanımı, aşınma direnci ve elastik geri kazanım özellikleri sayesinde mühendislik uygulamalarında yaygın olarak kullanılan bir termoplastik elastomer türüdür. Bu özellikleri nedeniyle TPU; ayakkabı tabanları, kablolar, otomotiv parçaları, endüstriyel contalar ve medikal cihaz bileşenleri gibi farklı sektörlerde uzun süredir tercih edilmektedir (Ciferri, 2005). Ayrıca TPU, eriyik akışkanlık özellikleri ve katmanlar arası bağlanma yeteneği sayesinde eklemeli imalat (3B yazıcı) teknolojilerinde yaygın olarak kullanılan elastomerik bir polimerdir. Bu malzeme, özellikle esnek ve darbeye dayanıklı yapıların üretiminde tasarım özgürlüğü sağlaması nedeniyle son yıllarda mühendislik uygulamalarında daha fazla ilgi görmektedir (Ngo et al., 2018).

Çekirdek yapıların üretiminde eklemeli imalat yöntemlerinin klasik aşamaları takip edilmiştir. Öncelikle çekirdek geometrisine ait CAD (Bilgisayar Destekli Tasarım) modeli, uygun yazılım kullanılarak oluşturulmuştur. Tasarımın tamamlanmasının ardından model, üretime hazırlanmak üzere dilimleme (slicing) yazılımına aktarılmıştır. Bu yazılım aracılığıyla kullanılan 3B yazıcının teknik özelliklerine ve TPU malzemenin işlenebilirliğine uygun yazdırma parametreleri

belirlenmiştir. Dilimleme işlemi sonucunda elde edilen G-code uzantılı dosya, taşınabilir bellek aracılığıyla yazıcıya aktarılmış ve üretim süreci başlatılmıştır.

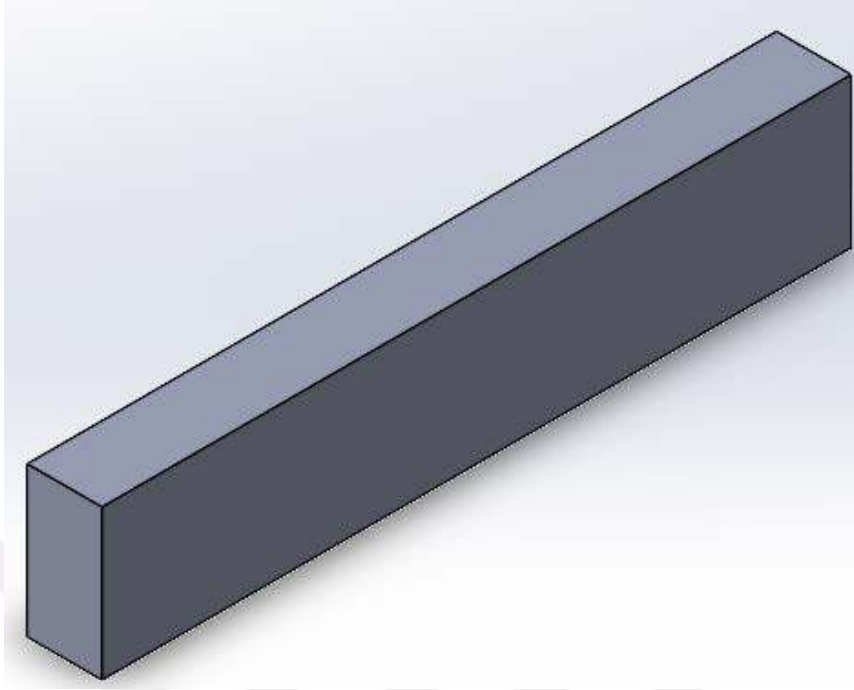
Bu çalışmada kullanılan çekirdek geometrileri; dolu, yıldız, bal peteği, re-entrant, arc re-entrant, kare, ince uzun ve üçgen yapılardan oluşmaktadır. Bu geometriler, sandviç kompozit yapıların mekanik performansını etkileyen doluluk oranı, geometrik karmaşıklık ve yük aktarım mekanizması gibi temel kriterler göz önünde bulundurularak seçilmiştir. Amaç, farklı geometrilerin aynı malzeme koşullarında ağırlık–dayanım dengesine ve enerji sönümleme davranışına olan etkilerini karşılaştırmalı olarak değerlendirmektir.

Klasik hücresel yapılar olan bal peteği, kare ve ince uzun modeller, literatürde sıkça incelenen, üretimi kolay ve homojen yük dağılımı sağlayan referans yapılar olarak tercih edilmiştir. Negatif Poisson oranına sahip re-entrant ve arc re-entrant modeller ise, deformasyon sırasında enerji sönümleme kabiliyetleri ve esneklikleriyle öne çıkmaktadır. Bu geometriler, özellikle düşük doluluk oranlarında (%39–42) hafiflik ve deformasyon kabiliyeti arasındaki dengeyi göstermesi açısından seçilmiştir. Yıldız ve üçgen yapılar ise daha karmaşık, çok yönlü yük taşıma yolları ve estetik geometrik düzenleri nedeniyle dahil edilmiştir. Bu yapıların doluluk oranları (%41–75 aralığında), yüksek rijitlik ve enerji absorpsiyonu potansiyelini yansıtacak şekilde optimize edilmiştir.

Tüm geometrilerin yüzey doluluk oranları, CAD ortamında oluşturulan modellerin görselleri üzerinden yapılan piksel tabanlı görsel analiz yöntemiyle belirlenmiştir. Her model, yüzey alanı bakımından eşit koşullarda değerlendirilmiş; doluluk oranı, “dolu alanın toplam alan içerisindeki oranı” olarak tanımlanmış ve tamamen dolu referans modele göre normalize edilmiştir. Bu yöntemle, farklı çekirdek geometrilerinin malzeme kullanımı–ağırlık–dayanım ilişkisi sayısal olarak karşılaştırılabilmektedir.

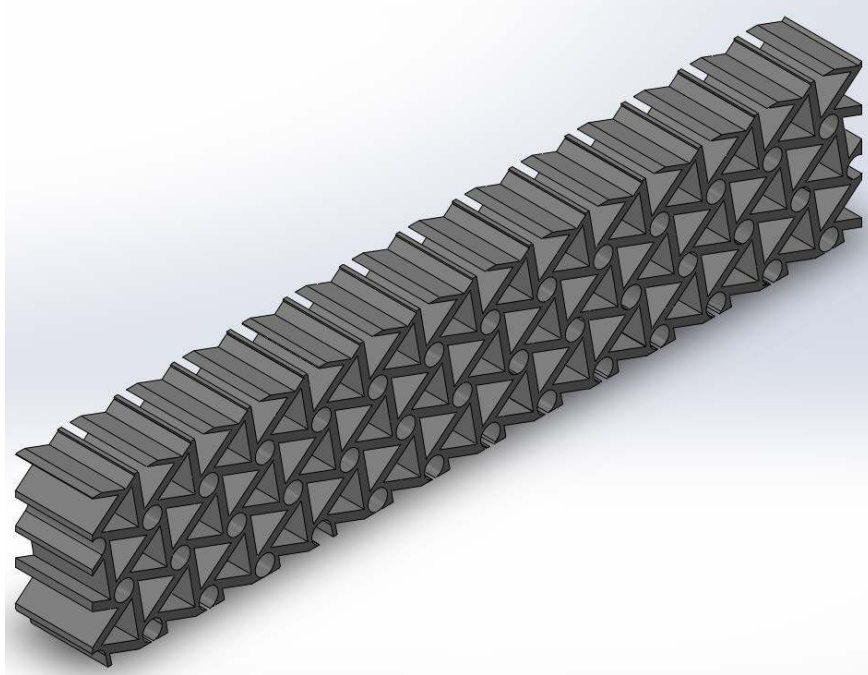
Bu yaklaşım, çalışmada kullanılan çekirdeklerin seçiminde yalnızca estetik veya geleneksel parametrelerin değil, aynı zamanda mekanik optimizasyon ve fonksiyonel performans kriterlerinin dikkate alındığını göstermektedir.

Dolu çekirdek yapının yüzey doluluk oranı %100 olarak belirlenmiştir.



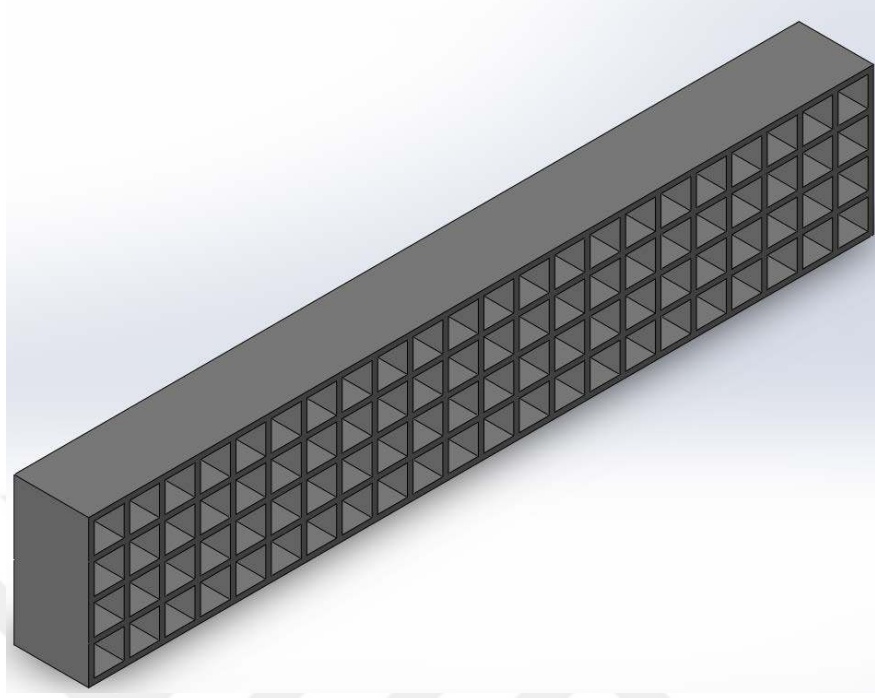
Şekil 2.4.Dolu çekirdek yapısı CAD çizim görseli

Üçgen çekirdek yapının yüzey doluluk oranı yaklaşık %44,5 olarak belirlenmiştir.



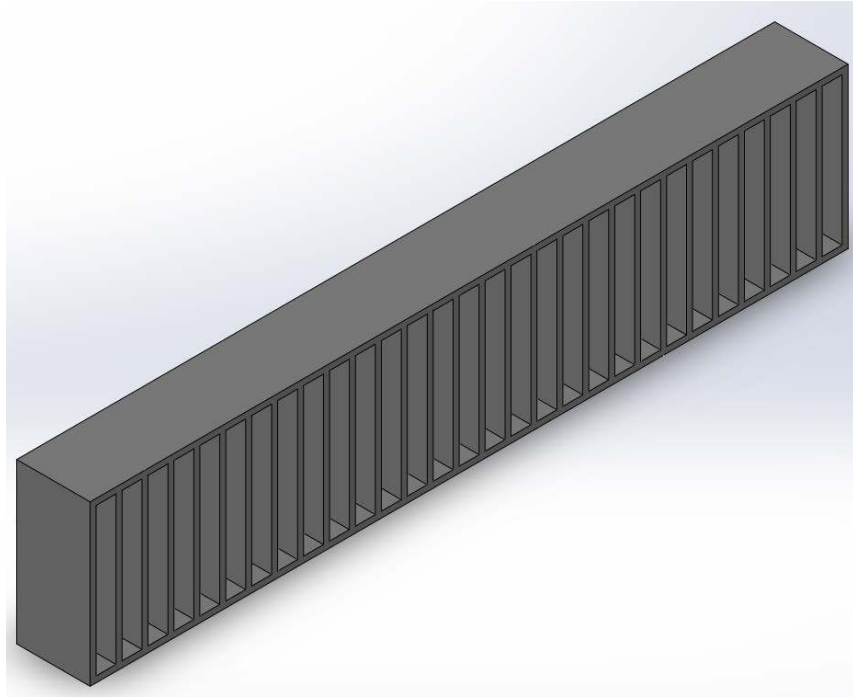
Şekil 2.5.Üçgen çekirdek yapısı CAD çizim görseli

Kare hücre geometrisine sahip çekirdek yapının yüzey doluluk oranı yaklaşık %37,2 olarak belirlenmiştir.



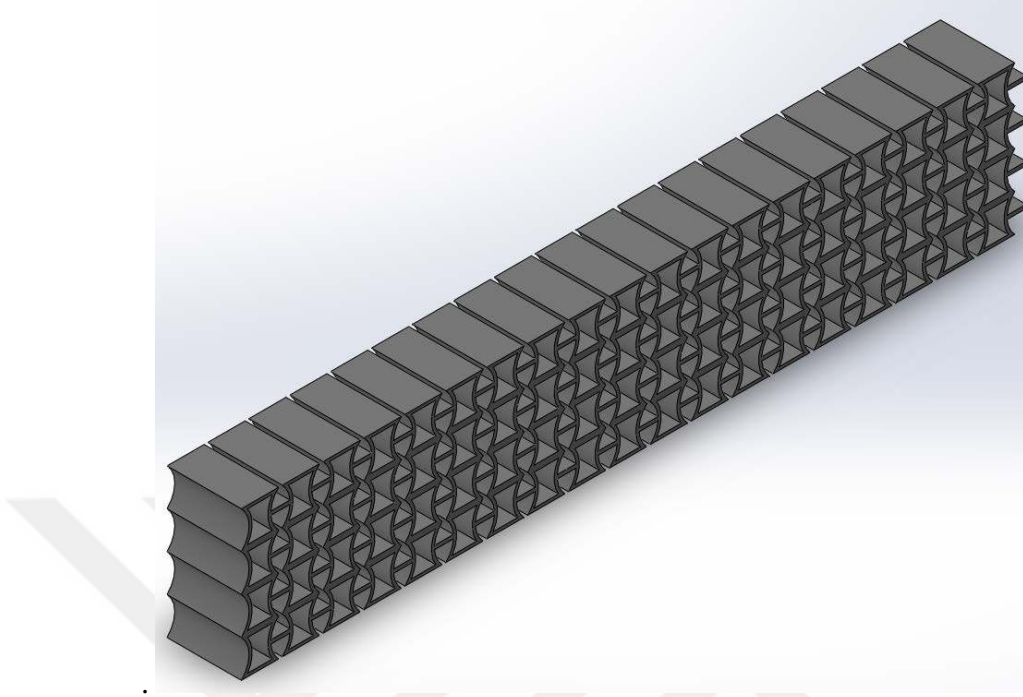
Şekil 2.6.Kare çekirdek yapısı CAD çizim görseli

İnce uzun hücre geometrisine sahip çekirdek yapının yüzey doluluk oranı yaklaşık %34,2 olarak belirlenmiştir.



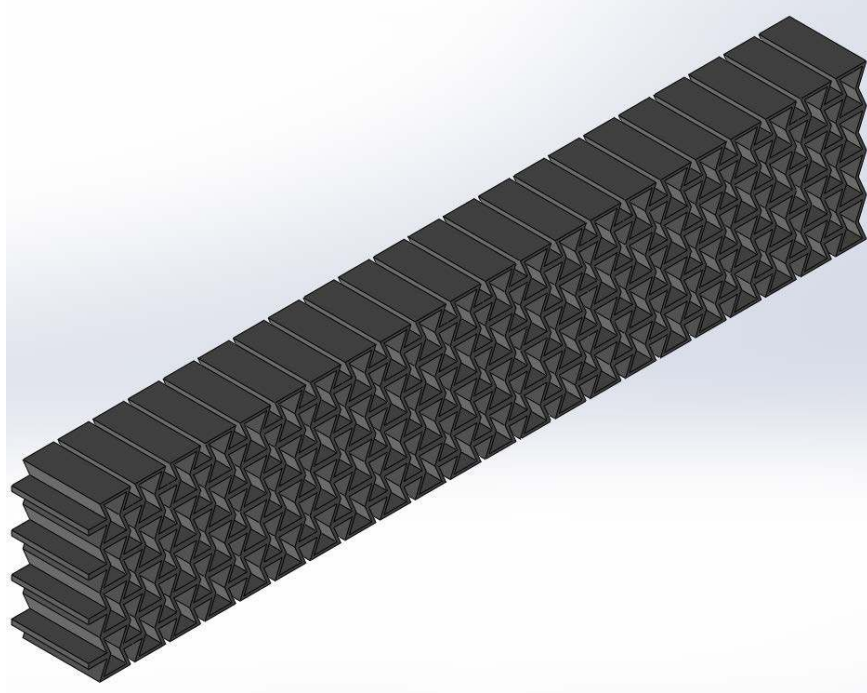
Şekil 2.7.İnce uzun çekirdek yapısı CAD çizim görseli

Arc re-entrant çekirdek yapının yüzey doluluk oranı yaklaşık %39,6 olarak belirlenmiştir



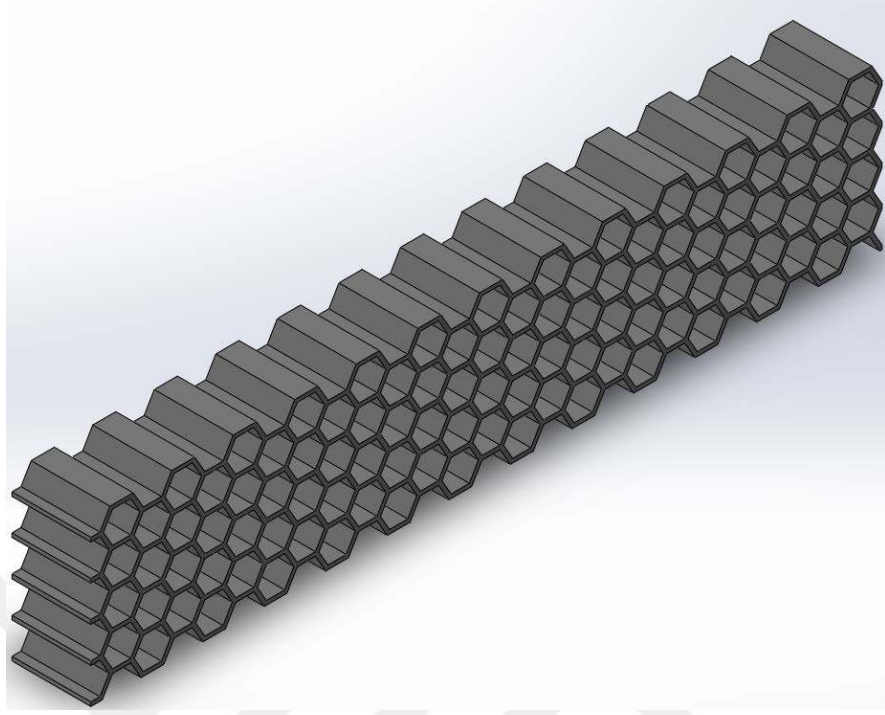
Şekil 2.8.Arc reatrant çekirdek yapısı CAD çizim görseli

Re-entrant çekirdek yapının yüzey doluluk oranı yaklaşık %41,7 olarak belirlenmiştir.



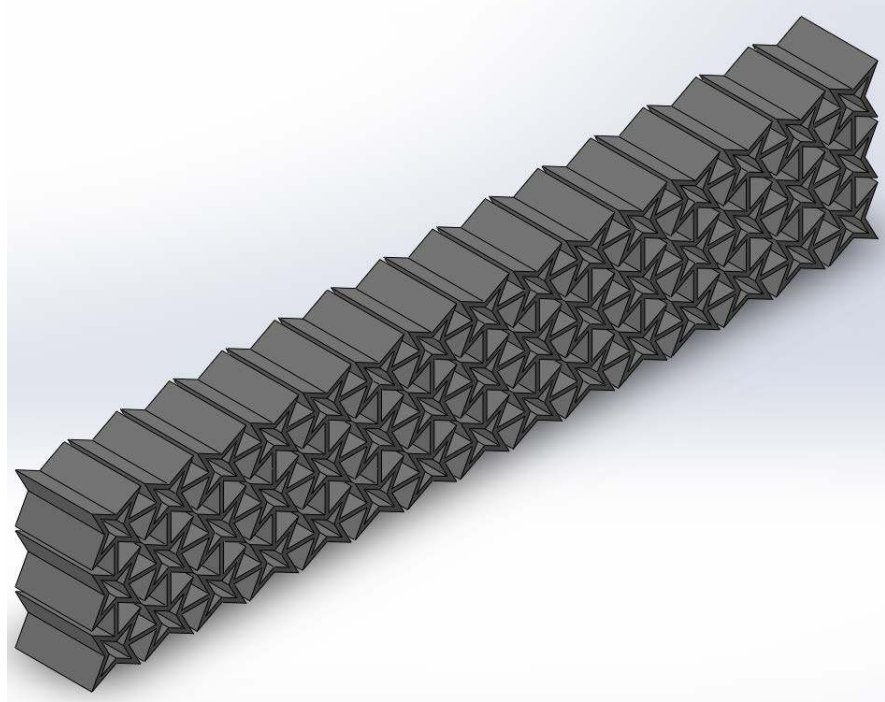
Şekil 2.9.Reatrant çekirdek yapısı CAD çizim görseli

Bal peteği hücre geometrisine sahip çekirdek yapının yüzey doluluk oranı yaklaşık %27,1 olarak belirlenmiştir.



şekil 2.10.Bal peteği çekirdek yapısı CAD  izim görseli

Yıldız geometrisine sahip çekirdek yapının yüzey doluluk oranı yaklaşık %41.9 olarak belirlenmiştir.



şekil 2.11.Yıldız  ekirdek yapısı CAD  izim görseli

Üretim işlemleri, TPU filamentin 3B yazıcının ekstrüderine yüklenmesiyle gerçekleştirilmiştir. Yazdırma esnasında katmanlar arası bağlanmanın düzgün şekilde sağlanabilmesi için sıcaklık, baskı hızı, tabla sıcaklığı, doluluk oranı ve katman kalınlığı gibi parametreler dikkatle kontrol edilmiştir. Çalışmada kullanılan 3B yazıcı parametreleri Tablo 2.1’de ayrıntılı olarak sunulmuştur. Panel formundaki kompozit yapılar için üretilcek tüm çekirdek bileşenlerde, üretim koşullarının tekrarlanabilirliğini sağlamak amacıyla aynı baskı parametreleri kullanılmıştır.

Tablo 2.2. 3B yazdırma parametreleri

Nozzle çapı	0.4 mm
Duvar sayısı	2
Yazdırma Sıcaklığı	230°C
Tabla Sıcaklığı	65°C
Oryantasyon açısı	45° , -45°
Katman Kalınlığı	0.12 mm
Yazdırma Hızı	90 mm/s

Bu tez kapsamında TPU malzemesi, eklemeli imalat yöntemi ile esnek çekirdek yapıların üretilmesinde kullanılmıştır. Bu yöntem sayesinde karmaşık geometrilere sahip, hafif ancak dayanıklı çekirdek elemanlar, geleneksel üretim yöntemleriyle elde edilmesi zor olan tasarım özgürlüğüyle üretilmiştir. Ayrıca 3B yazıcı teknolojisi, üretim süresini kısaltarak prototipleme ve seri üretim süreçlerinde önemli bir avantaj sağlamıştır.

2.1.3. Numune üretimleri

Bu çalışmada, kompozit yapının üretiminde hem geleneksel imalat teknikleri hem de ileri imalat teknolojileri bir arada kullanılarak bütüncül bir yaklaşım benimsenmiştir. Bu hibrit yöntem sayesinde, her iki üretim tekniğinin avantajlarından yararlanılarak yüksek performanslı, karmaşık geometrilere sahip bir kompozit yapı elde edilmiştir.

Bu tez kapsamında, kabuk ve çekirdek parçalar ayrı üretim yöntemleriyle elde edildikten sonra, uygun yüzey hazırlıkları ve yapıştırma teknikleri uygulanarak birleştirilmiştir. Böylece nihai kompozit malzeme yapısı, hem VARIM yönteminin sağladığı yüksek mekanik dayanım hem de eklemeli imalatın sunduğu geometrik esneklikten yararlanacak şekilde oluşturulmuştur. Bu hibrit yaklaşım, geleneksel yöntemlerin sınırlamalarını aşarken, ileri imalat teknolojilerinin sağladığı esnekliği de kompozit üretim süreçlerine entegre etmeyi amaçlamaktadır. Kabuk ve çekirdek malzemelerin epoksi yapıştırıcı ile birbirine bağlandığı numuneler Şekil 2.11’de görülmektedir.

Şekil 2.12.Test aşamasına hazır parçalar

2.2.Testler

2.2.1.Eğme Testi

Numunelerin üç nokta eğilme testleri, Shimadzu AG-IS 100 kN kapasiteli universal test cihazı (Autograph) (Şekil 2.5.) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu cihaz, yük kontrollü, deplasman kontrollü veya gerinim kontrollü modlarda çalışabilen, yüksek hassasiyetli servo-hidrolik bir sistemdir. Testler, cihazın üzerine monte edilen üç nokta eğilme fikstürü yardımıyla yapılmıştır. Alt destekler arasındaki açıklık (L), test edilen numune boyutuna göre ASTM D790 standardına uygun olarak ayarlanmıştır.

Test sırasında yükleme kafası, sabit hızla (örneğin 2 mm/dk) aşağı doğru hareket etmiş ve sistem tarafından anlık olarak kuvvet (F) ve yer değiştirme (δ) değerleri kaydedilmiştir. Elde edilen veriler, cihazın bilgisayarlı kontrol sistemi olan Trapezium X yazılımı aracılığıyla toplanmıştır. Kuvvet-deplasman verilerinden eğilme gerilmesi (σ) ve eğilme deformasyonu (ϵ) aşağıdaki denklemler yardımıyla hesaplanmıştır:

$$\sigma = \frac{3FL}{2bd^2}, \epsilon = \frac{6Dd}{L^2}$$

Burada;

- F: uygulanan maksimum yük (N)
- L: destek açıklığı (mm)
- b: numune genişliği (mm)
- d: numune kalınlığı (mm)
- D: orta nokta deplasmanı (mm)

Test cihazı ± 0.5 % doğrulukta ölçüm kapasitesine sahiptir ve maksimum 100 kN yük uygulayabilmektedir. Bu sayede hem düşük hem de yüksek dayanımlı kompozit malzemelerde yüksek tekrarlanabilirlikte sonuçlar elde edilmiştir. Ölçümler, cihazın yüksek çözünürlüklü yük hücresi (1 N hassasiyet) ve deplasman sensörü (0.001 mm çözünürlük) ile gerçekleştirilmiştir.

Eğme testi, malzemenin veya yapının eğme kuvveti altında göstereceği davranışı belirlemek amacıyla uygulanır. Bu yöntemde, numune iki destek üzerine yerleştirilir ve ortasından belirli bir hızla yük uygulanır. Test süresince uygulanan yük ve oluşan sehim (yer değiştirme) değerleri eş zamanlı olarak kaydedilir. Bu verilerden numunenin maksimum eğme dayanımı (σ_{maks}), elastisite modülü (E) ve maksimum yer değiştirme (δ_{maks}) değerleri hesaplanır. Maksimum mukavemet (σ_{maks}) değeri, malzemenin kırılma anında taşıyabileceği en yüksek gerilimi ifade eder ve yapının yük taşıma kapasitesinin bir göstergesidir. Elastisite modülü (E), malzemenin rijitliğini, yani elastik deformasyona karşı gösterdiği direnci temsil eder. Yüksek elastisite modülü, yapının eğme altında daha az deformasyona uğrayacağını gösterir. Maksimum yer değiştirme (δ_{maks}) değeri ise, yapının yük altında maruz kaldığı şekil değişikliğini nicel olarak ifade eder ve özellikle çekirdek yapının enerji sönmleme kapasitesinin değerlendirilmesinde önemli bir parametredir.

Elde edilen bu mekanik veriler, kabuk–çekirdek sisteminin yük taşıma kapasitesi, rijitlik düzeyi ve deformasyon davranışının bütüncül bir şekilde analiz edilmesine olanak tanımıştır. Özellikle hibrit üretim yöntemiyle üretilen bu yapıların davranışlarının deneysel olarak ortaya konulması, yöntemin mühendislik uygulamalarındaki potansiyelini değerlendirmek açısından kritik öneme sahiptir.

Sonuç olarak, ASTM D790 standardına uygun olarak gerçekleştirilen eğme testi, bu çalışmada yalnızca malzeme karakterizasyonu amacıyla değil, aynı zamanda geliştirilen hibrit yapının gerçek yükleme koşullarına benzer durumlar altında sergilediği mekanik tepkinin değerlendirilmesi için de temel bir yöntem olmuştur. Bu testlerden elde edilen veriler, çalışmanın deneysel kısmına önemli bir bilimsel temel sağlamıştır.

Şekil 2.13.AUTOGRAPH marka eğme test cihazı

2.2.2.Charpy Darbe testi

Numunelerin darbe dayanımlarının belirlenmesi amacıyla, MITECH XJU-22 model dijital Charpy/Izod darbe test cihazı (Şekil 2.6) kullanılmıştır. Bu cihaz, ASTM D6110, ASTM D256 ve ISO 179 standartlarına uygun olarak geliştirilmiş, sarkaç tipi yarı otomatik bir darbe test sistemidir. Testlerde, numunenin kırılması için gerekli enerjiyi ölçmek amacıyla Charpy konfigürasyonu (basit mesnetli kiriş tipi) tercih edilmiştir.

Deney sırasında cihazın sarkaç kolu belirli bir potansiyel enerji seviyesine getirilmiş ve serbest bırakılmıştır. Serbest bırakılan sarkaç, belirli bir hızla hareket ederek numunenin orta noktasına çarpmış ve kırılma enerjisi (E) cihazın dijital ekranı üzerinden Joule (J) cinsinden otomatik olarak okunmuştur. Ölçülen değer, malzemenin darbe dayanımını temsil etmektedir.

Darbe enerjisi, sistem tarafından aşağıdaki formül yardımıyla hesaplanmıştır:

$$E = mg(h_1 - h_2)$$

Burada;

- E: Kırılma enerjisi (J)
- m: Sarkaç kütlesi (kg)
- g: Yerçekimi ivmesi (9.81 m/s²)
- h₁: Sarkaç başlangıç yüksekliği (m)

- h₂: Çarpma sonrası maksimum yükselme yüksekliği (m)

Cihazın maksimum darbe enerjisi 22 J, darbe hızı 3.5 m/s, ve ölçüm hassasiyeti ± 0.001 J'dür. Testler sırasında kullanılan numuneler, $80 \times 10 \times 4$ mm boyutlarında hazırlanmış ve ASTM D256 standardına uygun şekilde çentik açılmıştır. Çentikli yüzey sarkaç yönüne bakacak biçimde konumlandırılmıştır.

Cihazın yapısı; bir yüksek hassasiyetli sarkaç kolu, numune yatakları (fıktür) ve dijital okuma ekranından oluşmaktadır. Deney sonunda elde edilen enerji değerleri cihazın otomatik dijital ölçüm sisteminden okunarak kayıt altına alınmıştır.

Bu testler, malzemelerin tokluk (impact toughness) özelliklerini belirlemek, farklı çekirdek geometrilerine sahip kompozit sandviç yapıların enerji absorpsiyon davranışlarını karşılaştırmak amacıyla gerçekleştirilmiştir.

Test sırasında, çentiksiz numune belirli kütleye sahip bir sarkaç çekiç ile tek bir darbe altında kırılmıştır. Numune kırılırken çekiç tarafından sistemden alınan enerji, malzeme tarafından absorbe edilmiş ve absorbe edilen enerji (Joule cinsinden) hesaplanmıştır. Bu enerji değeri, malzemenin ani yükler altında gösterdiği tokluk ve darbe dayanımı hakkında doğrudan bilgi verir. Çentiksiz test, özellikle kabuk-çekirdek hibrit yapılar gibi karmaşık kompozit sistemlerde, malzemenin kırılmaya başlamadan önce tüm yapısal bölümlerinin darbe yükünü nasıl taşıdığını ortaya koyar.

Bu çalışma özelinde, çentiksiz Charpy testi sayesinde kabuk ve çekirdek kombinasyonunun ani yükler altında sergilediği performans nicel olarak belirlenmiştir. Testten elde edilen sonuçlar, hibrit yapıların darbe dayanımını ve enerji absorpsiyon kapasitesini ortaya koyarken, kabuk-çekirdek etkileşiminin yapısal bütünlüğe katkısını da göstermiştir. Özellikle çentiksiz test uygulanması, numunenin doğal kırılma davranışının gözlemlenmesine olanak sağlayarak, hibrit üretim yönteminin mekanik avantajlarını değerlendirmek açısından kritik bir veri sağlamıştır.

Sonuç olarak, çentiksiz Charpy darbe testi, bu tez kapsamında üretilen hibrit kompozit yapıların ani yükler altındaki güvenilir performansını ve tokluk özelliklerini belirlemek için temel bir deneysel yöntem olarak kullanılmıştır. Elde edilen veriler hem mekanik tasarım optimizasyonu hem de ileri mühendislik uygulamaları için önemli bir referans niteliği taşımaktadır.

Şekil 2.14.MITECH marka charpy darbe testi cihazı

3. SONUÇLAR ve TARTIŞMA

Bu çalışmada hücresel çekirdek geometrilerinin mekanik performansları değerlendirilirken, grafiklerde dolu (tam dolu baskılanmış) numune referans amaçlı olarak kullanılmıştır. Dolu numunenin grafikte yer almasının temel nedeni, hücresel yapıların sunduğu dayanım, rijitlik ve enerji absorpsiyon kapasitelerinin, aynı malzemenin boşluksuz hâline göre göreceli olarak ne düzeyde değiştiğinin görülebilmesini sağlamaktır. Böylece geometrik tasarımın mekanik davranış üzerindeki etkisi, malzemenin kendisinden kaynaklanan özelliklerden bağımsız bir şekilde daha net biçimde analiz edilebilmektedir.

Dolu numune, aynı üretim yöntemi (FDM) ve aynı malzeme ile üretilmiş olması nedeniyle malzemenin gerçek maksimum potansiyel dayanımını temsil eder. Hücresel numuneler ise belirli bir duvar kalınlığı ve geometrik düzen içerdiğinden, mekanik davranışları hem malzemenin özelliklerinden hem de geometrik tasarımdan etkilenmektedir. Bu nedenle dolu yapı, çalışmada bir üst sınır niteliği taşır; hücresel geometrilerin bu üst sınırdan hangi oranda uzaklaştığı, yapısal verimliliğin anlaşılması açısından önemlidir.

Ancak çalışmanın temel amacı hücresel çekirdek tasarımlarının birbiriyle karşılaştırılması olduğundan, dolu numune karşılaştırmalı analizlere dahil edilmemiş, yalnızca grafiklerde “referans noktası” olarak tutulmuştur. Çünkü dolu yapı ile hücresel yapılar arasında kütle ve yük taşıma mekanizmaları bakımından doğrudan kıyaslama yapmak, hücresel mimarinin temel işlevi olan hafiflik–dayanım optimizasyonunu göz ardı ederek sonuçları yanıltabilir. Hücresel yapılar, doğal olarak belirli bir ağırlık azalması karşılığında bir miktar dayanım veya rijitlik kaybını kabul eden tasarımlardır; bu tasarım felsefesi dolu yapı için geçerli değildir.

Bu nedenle dolu numune, çalışmada yalnızca malzemenin teorik ve deneysel taban performansının belirlenmesi, hücresel yapılar için ise üst limit ve ölçeklendirme referansı sağlayan bir karşılaştırma aracı olarak kullanılmıştır. Grafik analizleri, hücresel geometriler arasındaki göreceli performans farklarını ortaya koymayı hedeflediği için dolu malzemenin yorumlamaya dahil edilmemesi bilimsel açıdan daha doğru bir yaklaşım olması hedeflenmiştir.

3.1. Eğme Testi Sonuçları

Bu çalışmada hibrit üretim yöntemi ile elde edilen farklı çekirdek geometrilerinin eğme davranışları, deneysel veriler ve üretim sonrası fiziksel görünüşleri birlikte değerlendirilmiştir. Çekirdek yapısı eklemeli imalatla termoplastik poliüretandan üretildiği için geometrinin yük taşıma karakteri kadar, üretim izleri, katman bütünlüğü ve hücre duvarlarının sürekliliği de eğme dayanımına doğrudan etki etmiştir. Her bir geometri için grafik verileriyle uyumlu olacak şekilde hem beklenen mekanik davranış hem de gözlemlenen üretim etkileri birlikte yorumlanmıştır.

Şekil 3.1’de hücresel çekirdek geometrilerinin eğme testi sonucunda elde edilen güncel eğme mukavemeti değerleri görülmektedir. Yeni deneysel bulgulara göre, hücresel yapılar arasında belirgin performans farkları oluşmuş ve her geometrinin taşıma mekanizması dayanım üzerinde farklı etkiler göstermiştir.

Re-entrant olarak adlandırılan öksatik yapı, eğme testlerinde 3.70 MPa dayanım sergilemiştir. Negatif Poisson karakteri sayesinde şekil değiştirme sırasında belirli bir stabilite sunmasına rağmen, üretim sırasında birleşim noktalarında oluşan yüzey düzensizlikleri ve katman çizgileri bu performansı sınırlamıştır. Hücre kollarında görülen çap değişimleri ve köşe bölgelerindeki küçük üretim izleri, re-entrant yapının orta seviyede dayanım göstermesine neden olmuştur.

İnce uzun hücre duvarlarına sahip yapı, bu seride 1.70 MPa ile en düşük eğme dayanımını göstermiştir. Bu sonuç, uzun hücre kollarının burkulmaya yatkın olmasının doğal bir yansımasıdır. Eklemeli imalatla karşılaşılan düzensiz katman birikimi, yüzey pürüzleri ve kesit süreksizlikleri yapının erken hasar göstermesini hızlandırmıştır. Eğme yükleri altında ince uzun geometrinin kararlı bir taşıma yolu oluşturamaması, bu düşük performansı açıklamaktadır.

Kavisli hücre kollarına sahip arc re-entrant yapısı 3.62 MPa seviyesinde dayanım göstermiştir. Enerjiyi eğrisel duvarlar boyunca dağıtabilen bu yapı, re-entrant sisteme benzer bir deformasyon davranışı sergilemiş olsa da hücre bağlantı noktalarında gözlenen kesit düzensizlikleri yük aktarımını sınırlamıştır. Bu nedenle arc re-entrant yapı orta seviyede bir sonuç elde etmiştir.

Yıldız biçimli hücresel geometri, eğme testinde 3.75 MPa dayanım üretmiş ve orta-alt seviyede performans göstermiştir. Yıldız topolojisinin keskin uçlarında oluşan gerilme yığılmaları ile bazı birleşim noktalarında tam dolmayan kesitler dayanımı düşürmüş, hücre uçlarının eğme altında erken çatlama eğiliminde olduğu gözlemlenmiştir.

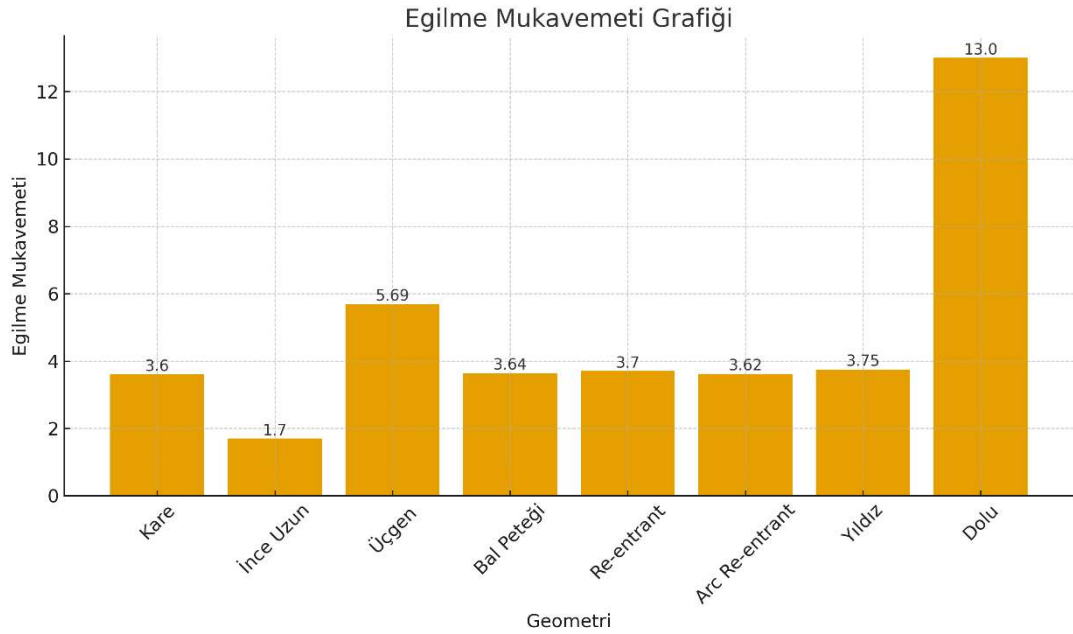
Bal peteği geometri, bu deney serisinde 3.64 MPa değerine ulaşarak orta seviyede bir sonuç vermiştir. Altıgen hücrelerin yükü yayma kabiliyeti teorik olarak daha yüksek bir mukavemet beklentisi oluştursa da, üretim esnasında hücre duvarlarında oluşan ince düzensizlikler ve katman yönlenmesi dayanımı sınırlandırmıştır. Buna rağmen bal peteği yapısı dengeli deformasyon karakteri sayesinde kararlı bir eğilme davranışı göstermiştir.

Kare geometri, eğme testinde 3.60 MPa ile bal peteğine yakın bir performans sergilemiştir. Kare hücrelerde köşe bölgeleri stres birikimine eğilimli olduğundan, üretim kaynaklı hafif köşe kusurları dayanımı azaltmıştır. Testler sırasında kare yapının genel deformasyonunun belirli bir rijitlik sunduğu ancak tepe noktalarında çatlak oluşumunun hızlandığı gözlenmiştir.

Üçgen hücreli yapı ise yeni deney sonuçlarında en yüksek eğme dayanımını elde etmiş ve 5.69 MPa değeriyle tüm geometrileri geride bırakmıştır. Üçgen yapının

aksiyel yük taşıma prensibine dayalı stabil hücre düzeni, eğme sırasında yükün doğrudan kollar boyunca aktarılmasını sağlamış; böylece deformasyon miktarı azalmış ve erken çatlak gelişimi gecikmiştir. Fotoğraflarda görülen birleşim sürekliliği ve hücre duvarlarının nispeten homojen doluluğu bu sonucu desteklemektedir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, aksiyel taşıma davranışı baskın olan üçgen yapı, yeni deneylerde de en yüksek eğme dayanımını üretmiş ve yapısal olarak en verimli geometri olarak öne çıkmıştır. Bal peteği, kare, yıldız ve re-entrant türevleri orta seviyede dayanım sunarken, ince uzun yapı açık ara en düşük performansı göstermiştir. Bu sonuçlar, çekirdek geometrisinin eğme dayanımı üzerinde belirleyici olduğu kadar, eklemeli imalat kalitesinin de nihai dayanımı önemli ölçüde etkilediğini ortaya koymaktadır.



Şekil 3.1.Eğilme Mukavemeti sonuçları

Şekil 3.2’de her bir çekirdek geometrisine ait eğme modülü (MPa cinsinden elastik rijitlik modülü) sonuçları verilmiştir. Yeni değerler incelendiğinde, geometriler arasında belirgin bir rijitlik farklılığı olduğu ve özellikle üçgensel yapının diğer tüm hücresel düzenleri belirgin biçimde geride bıraktığı görülmektedir.

Yeni deneysel sonuçlara göre eğme modülü sıralaması şu şekildedir: Üçgen (34,11 MPa); Kare (15 MPa); Bal peteği (12,85 MPa); Yıldız (9,35 MPa); İnce-uzun (10,35 MPa); Re-entrant (1,32 MPa); Arc re-entrant (1,28 MPa).

Üçgen hücreli yapı, 34,11 MPa değeriyle açık ara en yüksek eğme modülünü göstermiştir. Üçgensel topolojide hücre duvarları kısa ve gerilmeyi doğrudan aksiyel taşıma prensibiyle ilettiğinden, elastik bölgede rijitlik oldukça yüksektir. Düğümünün sürekliliği ve geometrik kararlılık, eğilme sırasında deformasyonun sınırlı kalmasını sağlamış ve böylece en rijit yapı olarak öne çıkmıştır.

Kare geometri 15 MPa ile ikinci sırada yer almıştır. Kare yapı, düğümlerde yük aktarımı üçgene göre daha az etkili olmasına rağmen, dört yönlü simetrik düzeniyle elastik alanda nispeten kararlı davranmıştır. Hücre köşelerinde görülen hafif üretim izleri modülü sınırlasa da genel yapısal düzen rijitliği desteklemiştir.

Bal peteği geometri 12,85 MPa ile üçüncü sıraya yerleşmiştir. Altıgen hücrelerin yükü düzlemsel olarak yayma kabiliyeti nedeniyle bal peteği yapılar teorik olarak yüksek özgül rijitliğe sahiptir. Ancak FDM üretiminde görülmesi muhtemel yüzey dalgalanmaları ve hücre duvar kalınlığındaki küçük farklılıklar bu değer in üçgensel geometrinin altında kalmasına neden olmuştur.

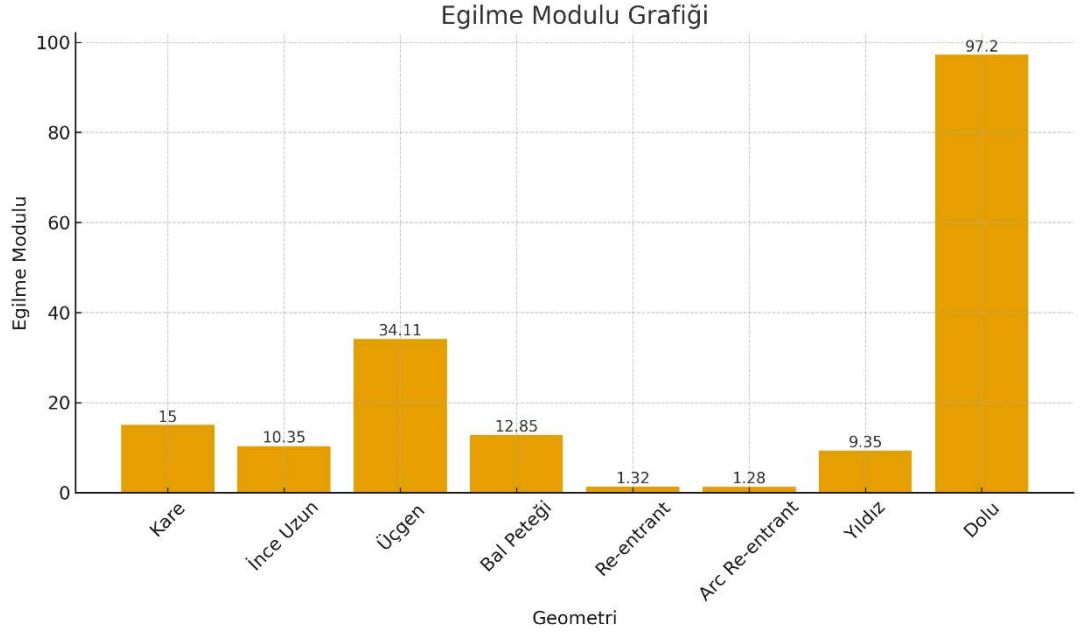
Yıldız biçimli geometri 9,35 MPa ile orta seviyede bir rijitlik sergilemiştir. Yıldız topolojisi hücre uçlarında gerilme yığılmasına ve yük aktarımında süreksizliklere neden olduğu için elastik modülün düşmesi beklenen bir durumdur. Birleşim noktalarında görülen tam dolmayan kesitler de modülü negatif yönde etkilemiştir.

İnce-uzun hücre duvarlarına sahip yapı 10,35 MPa ile yıldız geometrisine yakın bir değer üretmiştir. Bu geometri elastik bölgede bile daha esnek davranmaya yatkındır; uzun kolonların geometrik stabilitesinin düşük olması modülün sınırlanmasına neden olmuştur. FDM üretiminde bu tip ince duvarlı yapılarda katman süreksizliği ve kesit dalgalanmaları modül değerinin düşmesinde önemli rol oynamıştır.

Re-entrant (1,32 MPa) ve arc re-entrant (1,28 MPa) yapılar eğme modülü açısından anlamlı derecede düşük değerler göstermiştir. Bu sonuç, öksatik yapıların elastik bölgede genişlemeye izin veren hücre açlarından kaynaklanmaktadır. Negatif Poisson etkisi, rijitlikten ziyade şekil değiştirebilirliği artırdığı için bu yapıların düşük modül değerleri beklenen davranışla uyumludur. Kolların eğriselliği ve hücre açıları elastik deformasyon sırasında daha fazla şekil değişimine izin verdiğinden rijitlik zayıflamıştır.

Üretim kalitesi de modül değerlerini doğrudan etkilemiştir. FDM tabanlı üretimde katman yüksekliği, ekstrüzyon oranı, hücre duvarı sürekliliği, yüzey pürüzlülüğü gibi parametreler elastik rijitlik üzerinde belirleyici olmaktadır. Özellikle ince kesitli hücreler, katmanlar arası yapışma kalitesine daha duyarlı olduğundan modül değerleri bu kusurlardan daha fazla etkilenmiştir. Ayrıca çekirdek-kabuk arayüzündeki mikroskobik sertleşme bölgeleri ve iç gerilmeler de ölçülen modüllerde farklılığa yol açmıştır.

Genel olarak değerlendirildiğinde, üçgen geometri en rijit yapıyı oluştururken bal peteği ve kare yapılar orta seviyede rijitlik sunmuş; öksatik yapılar ise elastik şekil değiştirme odaklı karakterleri nedeniyle modül açısından düşük seviyede kalmıştır. Bu bulgular, hücresel çekirdek tasarımında rijitlik gerektiren uygulamalar için üçgen ve bal peteği geometriyi öne çıkarırken, şekil değiştirebilirlik gereken alanlarda öksatik yapıların tercih edilebileceğini göstermektedir.



Şekil 3.2. Eğilme Modülü sonuçları

Şekil 3.3'te her bir çekirdek geometrisine ait maksimum yer değiştirme (mm) değerleri görülmektedir. Maksimum yer değiştirme, numunenin eğme yükü altında kırılmadan önce ulaştığı en büyük deformasyon miktarını ifade eder. Daha küçük değerler daha rijit ve deformasyona karşı dirençli bir yapı karakterini yansıtırken, daha büyük değerler daha esnek ve şekil değiştirmeye açık bir davranışa işaret etmektedir. Yeni deneysel verilere göre maksimum yer değiştirme değerleri şu şekildedir: İnce-uzun 22,39 mm; Bal peteği 21 mm; Yıldız 16,39 mm; Kare 16,9 mm; Re-entrant 11,95 mm; Arc re-entrant 12,51 mm; Üçgen 9,07 mm.

İnce-uzun yapı 22,39 mm ile en yüksek yer değiştirme değerini göstermiştir. Bu sonuç, ince ve uzun kolonlardan oluşan topolojinin eğme altında kolayca şekil değiştirdiğini ve düşük rijitlik sergilediğini doğrulamaktadır. Uzun kolonların elastik bölgeden plastik bölgeye daha erken geçiş eğilimi, yer değiştirme değerinin yüksek olmasına katkı sağlamıştır. Eklemeli imalatla üretilen bu ince kolonlarda katmanlar arası yapışmanın zayıf olması deformasyonun daha kolay ilerlemesine yol açmıştır.

Bal peteği geometri 21 mm ile ikinci en yüksek yer değiştirme değerine sahiptir. Bu yapı, altıgen hücre duvarlarının belirli bir elastik esneklik sunması sayesinde deformasyona daha fazla izin vermektedir. Bal peteğinin rijitlik açısından orta seviyede olmasının altında, hücre duvarlarının belirli bölümlerinin eğilme altında kısmen dönmeye izin vermesi yatmaktadır. Ancak bu deformasyon kontrollü şekilde gerçekleşmiş ve ani kırılma eğilimi göstermemiştir.

Yıldız geometri 16,39 mm ile orta-yüksek yer değiştirme sergilemiştir. Yıldız topolojisinin uzun ve keskin uçları, eğme sırasında yüksek gerilme yığılmalarına neden olmakta ve bu bölgelerde şekil değişimi hızlı ilerlemektedir. Birleşim

noktalarında görülen kesit düzensizlikleri, yıldız geometrisinin deformasyona karşı sınırlı rijitlik sunmasına neden olmuştur.

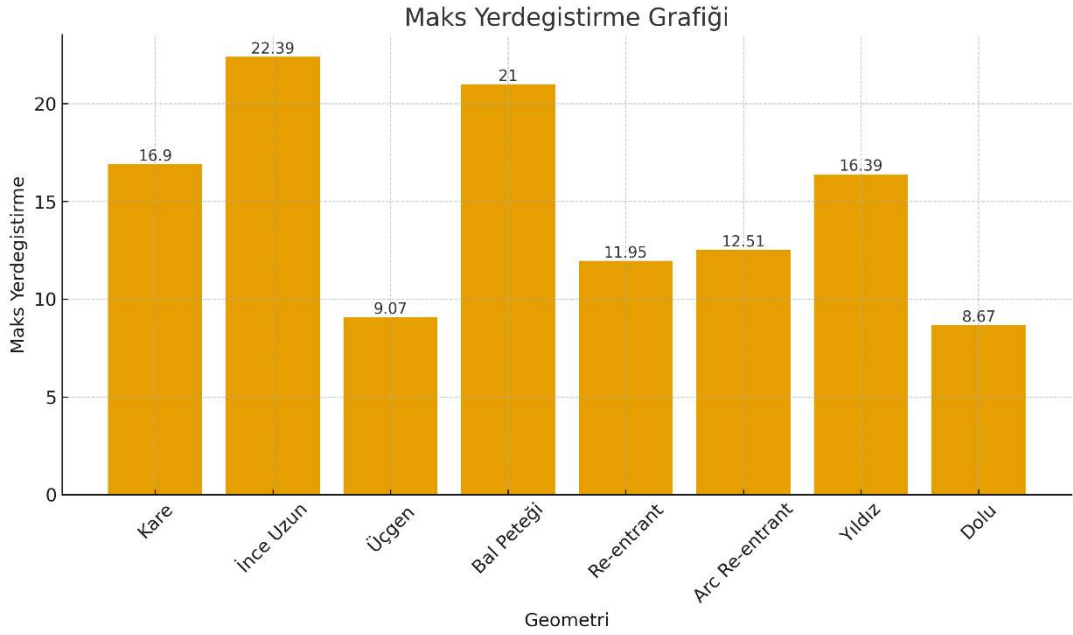
Kare geometri 16,9 mm ile yıldız yapıya yakın bir deformasyon miktarı göstermiştir. Kare hücrelerde köşeler yük aktarımında kritik bölgeler oluşturduğundan, eğme etkisi altında bu alanlarda yer değiştirme hızla artmaktadır. Bu nedenle kare geometri orta düzeyde rijitlik ancak belirgin bir deformasyon kapasitesi sergilemiştir.

Re-entrant (11,95 mm) ve arc re-entrant (12,51 mm) yapılar orta seviyede maksimum yer değiştirme göstermiştir. Öksatik karakterli bu yapılar, eğme sırasında genişleme eğilimi gösteren hücre açıları sayesinde deformasyonu belirli bir bölgede yayabilmekte, ancak bu deformasyon elastik alanda kontrollü bir şekilde ilerlemektedir. Bu nedenle öksatik geometrilerin yer değiştirme değerleri ne çok yüksek ne de çok düşük çıkmış; esneklik ile şekil değiştirme kontrolü arasında dengeli bir davranış sergilemişlerdir.

Üçgen geometri 9,07 mm ile en düşük maksimum yer değiştirmeyi gösteren yapı olmuştur. Üçgensel topolojinin kısa kolonları ve yüksek aksiyel taşıma kapasitesi, eğme altında gövde şekil değişimini sınırlamakta ve numunenin rijitliğini önemli ölçüde artırmaktadır. Üçgen hücre duvarları boyunca yükün doğrudan iletilmesi, kırılma noktası öncesinde deformasyonun daha az ilerlemesine imkân tanımıştır.

Fotoğraf incelemeleri, yüksek yer değiştirme sergileyen numunelerde (özellikle ince-uzun ve bal peteği yapılarda) kolon yüzeylerindeki mikro-oyukların, yüzey pürüzlerinin ve katman sınırı çizgilerinin yoğun olduğunu göstermiştir. Bu bölgeler, eğilme sırasında lokal şekil değiştirme merkezleri gibi davranarak deformasyonun daha hızlı ilerlemesine neden olmuştur. Buna karşılık üçgen ve kare geometrilerde hücre duvar sürekliliğinin yüksek olması, ani deformasyon bölgelerinin oluşmasını engelleyerek daha sınırlı yer değiştirme değerleri elde edilmesini sağlamıştır.

Genel olarak değerlendirildiğinde, ince-uzun ve bal peteği yapılar en esnek, üçgen yapı ise en rijit davranışı göstermiştir. Re-entrant ve arc re-entrant geometriler orta düzeyde deformasyon kapasitesi sunarken kare ve yıldız yapılar deformasyon açısından ara seviyede yer almıştır. Bu sonuçlar, çekirdek geometrisinin eğme altındaki deformasyon mekanizmasında belirleyici bir parametre olduğunu göstermektedir.



Şekil 3.3.Maksimum Yer Değiştirme sonuçları

Şekil 3.4’te her bir çekirdek geometrisine ait kütle değerleri görölmektedir. Yeni deneysel veriler değerlendirildiğinde geometriler arasında belirgin bir kütle farklılığı olduğu ve hücresel topolojinin malzeme tüketimi üzerinde doğrudan etkili olduğu anlaşılmaktadır. Ölçölen kütle değerleri şu şekildedir: Bal peteği 7,8 g; İnce-uzun 8,89 g; Yıldız 9,57 g; Arc re-entrant 9,58 g; Kare 9,73 g; Re-entrant 10,05 g; Üçgen 11,37 g.

Bal peteği geometrisi 7,8 g ile en düşük kütle değerini göstermiştir. Altıgen hücresel düzenin verimli duvar yerleşimi sayesinde belirli bir rijitlik elde etmek için daha az malzeme kullanılması mümkündür. Bu yapı, yüzey alanı–hacim oranı yüksek bir mimari sunduğu için özgül performans çalışmaları açısından avantaj sağlamaktadır. Bal peteğinin bu kadar düşük kütle üretmesi, literatürde sıkça vurgulanan “yüksek mekanik verimlilik / düşük malzeme tüketimi” karakteriyle uyumludur.

İnce-uzun yapı 8,89 g ile ikinci en düşük kütledeyi göstermiştir. Bu geometri uzun hücre kollarına sahip olup kesitte daha az yoğunlukta malzeme bulundurduğu için hafif bir yapıya sahiptir. Ancak bu hafiflik mekanik deneylerde daha düşük rijitlik ve daha yüksek yer değiştirme değerleriyle sonuçlanmıştır; bu durum ince kolon geometrilerinin hafif olsa da taşıma kapasitesi açısından sınırlı olduğunu göstermektedir.

Yıldız (9,57 g) ve arc re-entrant (9,58 g) geometrileri birbirine oldukça yakın değerlere sahiptir. Bu yapılar, karmaşık çok kollu topolojilere sahip olmalarına rağmen, hücre duvarlarının nispeten ince olması kütledeyi ekonomik seviyede tutmuştur. Yıldız yapıda bazı uç bölgelerinde ince kesitlerin bulunması malzeme tüketimini

azaltmıştır; arc re-entrant yapıda ise hücre kavisleri malzemenin daha eşit dağılmasını sağlamıştır.

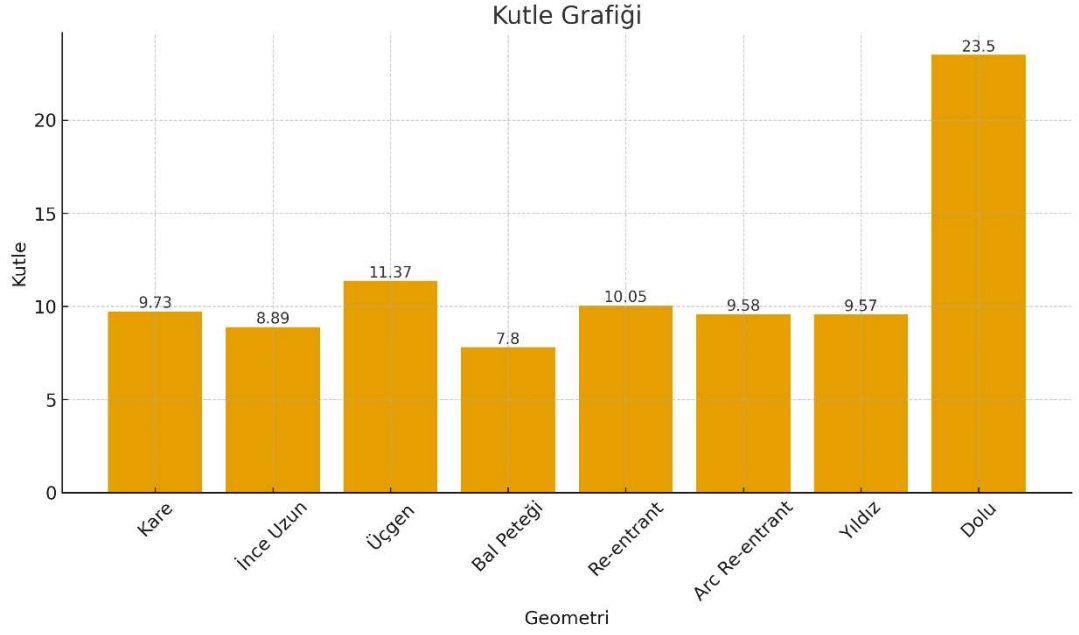
Kare geometri 9,73 g ile orta seviyede kütle üretmiştir. Dörtgen hücrelerin köşe bölgelerinde daha yüksek malzeme birikimi olsa da genel olarak duvar uzunluklarının dengeli olması kütle artışını sınırlamıştır. Kare geometri hafiflik–yük taşıma dengesi açısından görece stabil bir yapı sunmuştur.

Re-entrant yapı 10,05 g ile üst-orta seviyede kütle göstermiştir. Öksatik davranışın temelini oluşturan ters açılar ve kolların geometrik olarak dışa kıvrıldığı bölgelerin nispeten daha kalın kesit oluşturması, re-entrant geometrinin kütlesini artırmıştır. Hücrelerin içeri doğru bükülmesi, üretim sırasında duvar kalınlığının yer yer artmasına neden olmuştur.

Üçgen yapı 11,37 g ile en yüksek kütleyle sahip çekirdek topolojisi olmuştur. Üçgensel geometrilerde hücre duvarları kısa fakat görece kalın yapılmakta ve düğüm bölgelerinde daha fazla malzeme birikmektedir. Ayrıca yük aktarımının büyük ölçüde aksiyel kolonlar üzerinden gerçekleşmesi gerektiği için üretim sırasında bu duvarlar daha dolgun biçimde oluşmaktadır. Bu nedenle üçgen, rijitlik ve mukavemet açısından en iyi performansı göstermesine rağmen kütle açısından en yüksek değeri üretmiştir.

Kütle sonuçları değerlendirilirken üretimden kaynaklanan değişkenliklerin etkisi de göz önünde bulundurulmalıdır. FDM tabanlı eklemeli imalatla filament akışı, ekstrüzyon oranı, yol genişliği ve katman doluluğu kütleyi doğrudan etkilemektedir. Fotoğraf incelemelerinde bazı numunelerde hücre duvarları boyunca görülen lokal malzeme birikimleri, ekstrüzyon artışının küçük kütle farklarına neden olduğunu göstermektedir. Ayrıca kaplama işlemleri sırasında kabuk–çekirdek arayüzünde oluşan ince dolgu tabakaları da nihai kütle üzerinde sınırlı etkiye sahiptir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, bal peteği, ince-uzun ve yıldız yapılar en hafif çekirdekleri oluştururken, üçgen yapı en yüksek kütleyle sahip olmuştur. Re-entrant türü yapılar ise orta-yüksek kütle seviyesinde konumlanmıştır. Bu sonuçlar, hücresel çekirdek tasarımının yalnızca mekanik performans açısından değil, ağırlık optimizasyonu açısından da kritik rol oynadığını göstermektedir.



Şekil 3.4.Kütüphane sonuçları

3.2. Charpy Darbe Testi Sonuçları

Şekil 3.5'te numunelerin Charpy darbe enerjisi (J) sonuçları görülmektedir. Bu değerler, numunelerin darbe altında kırılmadan önce absorbe edebildiği toplam enerjiyi ifade eder ve yapının süneklik, kırılma direnci ve enerji sönümleme kapasitesi hakkında doğrudan bilgi verir. Yeni ölçümlere göre darbe enerjisi değerleri şu şekildedir:

Üçgen 15,42 J; Bal peteği 5,45 J; Yıldız 5,36 J; Arc re-entrant 5,05 J; Re-entrant 4,92 J; Kare 5,99 J; İnce-uzun 4,28 J.

Üçgen hücreli yapı 15,42 J ile açık ara en yüksek darbe enerjisini absorbe eden geometri olmuştur. Üçgensel topolojinin yük aktarımını aksiyel kol düzeni üzerinden gerçekleştirmesi, darbeyi hücre duvarlarına eş zamanlı olarak yayarak kırılma öncesi çok daha fazla enerji depolanmasına imkân tanımıştır. Düzgümlerdeki süreklilik ve kısa kolonların stabil davranışı, üçgen geometrinin sünek darbe davranışını desteklemiştir. Bu sonuç, üçgen yapının yalnızca rijit değil, aynı zamanda darbe altında yüksek enerji absorpsiyon kapasitesine sahip olduğunu göstermektedir.

Bal peteği geometri 5,45 J ile ikinci yüksek enerji kapasitesine sahip geometrilerden biri olmuştur. Altıgen hücre düzeni, yükü hücre duvarlarına nispeten dengeli dağıtmakta ve kontrollü bir kırılma mekanizması oluşturmaktadır. Ancak üçgen geometriyle karşılaştırıldığında bal peteğinin kolon sürekliliği daha zayıf olup hücre duvarlarının eğilme etkisine açık olması darbe sırasında daha erken hasar oluşmasına neden olmuştur.

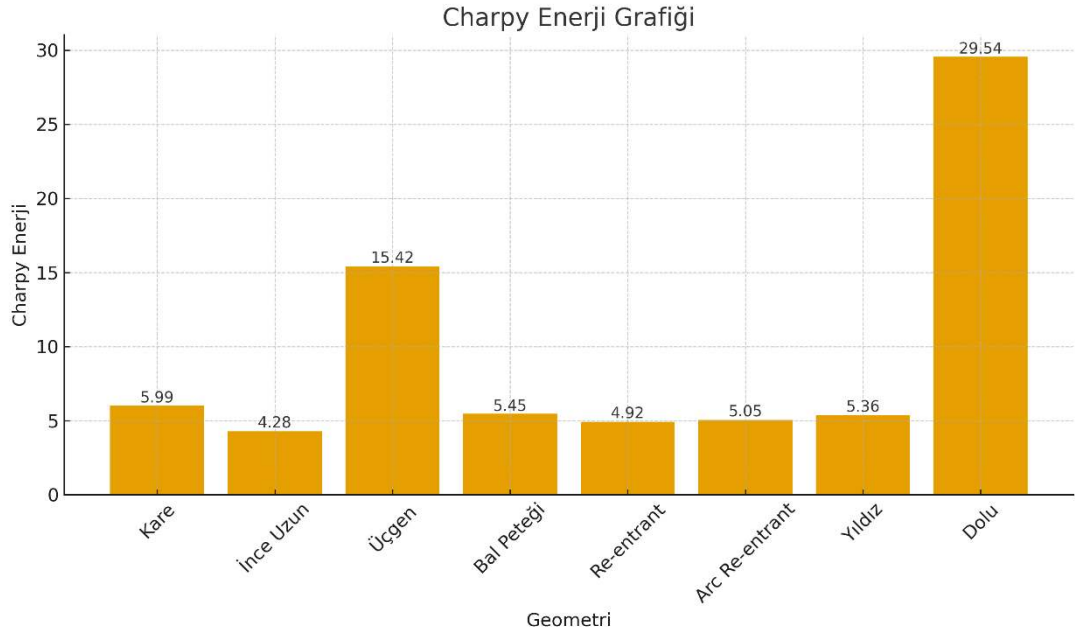
Kare (5,99 J), yıldız (5,36 J) ve arc re-entrant (5,05 J) geometrileri orta seviyede darbe enerjisi absorpsiyonu göstermiştir. Kare yapıda köşe bölgelerinde oluşan gerilme odakları kırılma başlangıcını hızlandırmış; yıldız geometrisinde ise keskin hücre uçlarında gerilme yığılması ve yerel çatlak ilerlemesi enerji absorpsiyon kapasitesini sınırlandırmıştır. Arc re-entrant yapının öksatik karakteri darbe sırasında belirli bir şekil değiştirme kabiliyeti sağlasa da bu deformasyon stabil bir enerji dağılımı sunamadığı için enerji sönümleme kapasitesi orta düzeyde kalmıştır.

Re-entrant yapı 4,92 J ile arc re-entrant'a yakın bir performans sergilemiş, öksatik açılarda şekil değiştirme sırasında hücre genişlemesine izin vermesi enerji absorpsiyonunu bir miktar artırmıştır. Ancak hücre kollarında görülen eğrilik ve kesit farklılıkları, darbeyi homojen yaymayı engellemiş ve enerjinin sınırlı bir bölgede yoğunlaşmasına neden olmuştur.

İnce-uzun yapı 4,28 J ile en düşük darbe enerjisini göstermiştir. Uzun ve ince kolonların darbe altında kolayca burkulması, enerjinin sünek şekilde emilmesini engelleyip ani kırılma davranışına yol açmıştır. FDM üretiminde ince duvarlarda görülen yüzey pürüzleri, kesit düzensizlikleri ve katman zayıflıkları çatlak başlangıç noktalarının oluşmasına neden olarak darbe enerjisini daha da düşürmüştür.

Darbe testlerinde yüzey kusurlarının, mikro-çatlakların ve kesit süreksizliklerinin kritik etkileri olduğu bilinmektedir. Fotoğraf incelemelerinde özellikle ince-uzun ve re-entrant yapılarda görülen küçük boşluk ve eksik dolum bölgelerinin darbe sırasında kırılmayı hızlandırdığı, buna karşın üçgen yapıda hücre duvar bütünlüğünün daha iyi korunması sayesinde enerji absorpsiyonunun çok daha yüksek olduğu gözlenmiştir.

Genel olarak sonuçlar, üçgen geometrinin darbe enerjisi açısından diğer tüm hücresel yapılardan belirgin şekilde üstün olduğunu göstermekte; bal peteği, yıldız, kare ve öksatik yapılar orta seviyede performans sunarken ince-uzun yapı en düşük enerji absorpsiyon kapasitesine sahip olmaktadır. Bu bulgular, çekirdek geometrisinin darbe altındaki enerji sönümleme mekanizmasını belirlemede kritik bir parametre olduğunu ortaya koymaktadır.



Şekil 3.5.Enerji sonuçları

Şekil 3.6’da numunelerin alan başına darbe dayanımı (kJ/m^2) değerleri verilmiştir. Bu parametre, çekirdek geometrilerinin darbe yükü altındaki kırılmaya karşı gösterdiği direnci ortaya koymakta olup, hücresel yapının darbenin oluşturduğu enerjiyi ne ölçüde absorbe ederek yükü yayabildiğini göstermektedir. Ölçülen değerlere göre sıralama şu şekildedir:

Üçgen ($25,1 \text{ kJ/m}^2$); Re-entrant ($23,0 \text{ kJ/m}^2$); Arc re-entrant ($22,1 \text{ kJ/m}^2$); Kare ($21,3 \text{ kJ/m}^2$); Bal peteği ($20,8 \text{ kJ/m}^2$); Yıldız ($20,2 \text{ kJ/m}^2$); İnce-uzun ($19,4 \text{ kJ/m}^2$).

Üçgen geometri $25,1 \text{ kJ/m}^2$ ile en yüksek darbe dayanımını göstermiştir. Üçgensel hücre yapısında kolonların kısa olması ve yük aktarımının aksiyal doğrultuda gerçekleşmesi, darbenin etkisini hücre duvarları boyunca hızlı şekilde yayarak lokal gerilmelerin yoğunlaşmasını engellemektedir. Bu düzenli yük dağılımı, üçgen topolojinin darbe altında yüksek dirence sahip olmasının temel nedenidir.

Re-entrant ($23,0 \text{ kJ/m}^2$) ve arc re-entrant ($22,1 \text{ kJ/m}^2$) yapılar da yüksek darbe dayanımı değerleri üretmiştir. Öksatik yapılar negatif Poisson oranı nedeniyle şekil değiştirme sırasında hücrelerin genişlemesine izin verir; bu mekanizma darbe enerjisinin hücre boyunca yayılmasını kolaylaştırarak kırılma öncesi daha fazla deformasyon enerjisinin absorbe edilmesine olanak tanır. Arc re-entrant yapının re-entrant’a kıyasla hafifçe daha düşük sonuç üretmesi, kavisli hücre duvarlarında yerel gerilme artışlarının oluşmasıyla ilişkilendirilebilir.

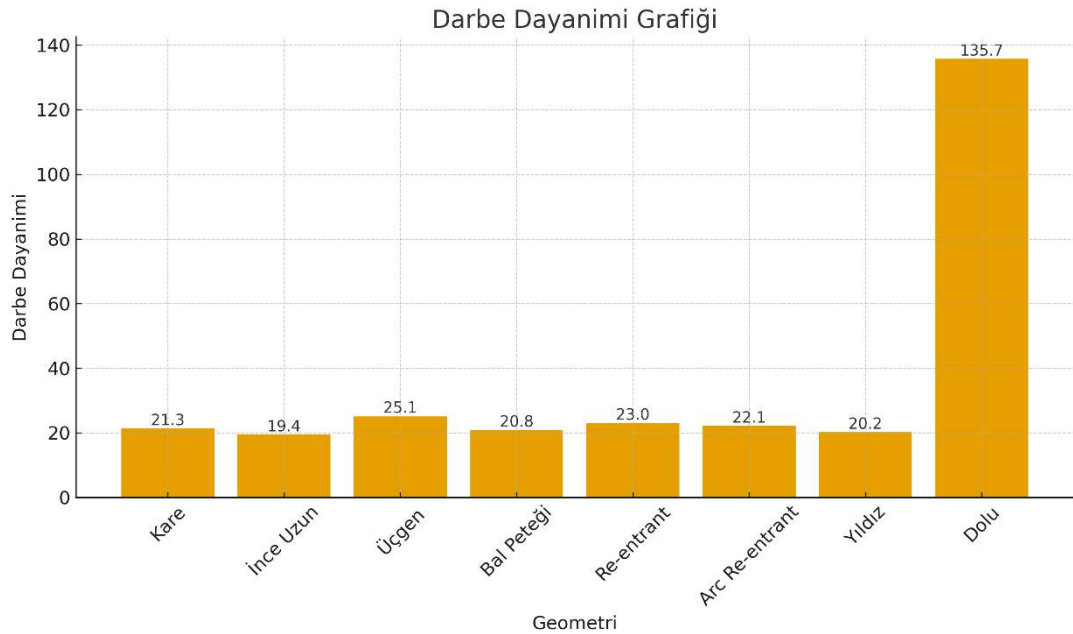
Kare geometri $21,3 \text{ kJ/m}^2$ ile orta seviyede bir darbe dayanımı göstermiştir. Kare hücrelerde köşe bölgeleri darbe sırasında gerilme odaklarının yoğunlaştığı kritik noktalar. Bununla birlikte kare yapı, dört yönlü düzenin sağladığı yük dağılımı nedeniyle yıldız ve ince-uzun yapıdan daha yüksek performans ortaya koymuştur.

Bal peteği 20,8 kJ/m² ile kareye çok yakın bir değer sergilemiştir. Teorik olarak altıgen yapı darbe yükünü çok yönlü dağıtma potansiyeline sahiptir; ancak hücre duvarlarının belirli bölgelerde ince olması kırılma başlangıcını hızlandırarak dayanımı sınırlamıştır. Bu nedenle bal peteği, dengeli fakat üçgen ve öksatik yapılar kadar yüksek olmayan bir darbe dayanımı sunmuştur.

Yıldız biçimli yapı 20,2 kJ/m² ile orta-alt seviyede performans göstermiştir. Yıldız topolojisinin keskin hücre uçları gerilme yığılması oluşturarak çatlak başlama bölgelerine dönüşmekte, bu durum darbe dayanımını düşürmektedir. Yükün düzensiz dağıldığı bu tip yapılarda kırılma süreci daha erken başlamaktadır.

İnce-uzun yapı 19,4 kJ/m² ile en düşük darbe dayanımını sergilemiştir. Uzun ve ince kolonlar darbeye karşı burkulmaya son derece yatkındır ve bu burkulma davranışı enerjinin verimli şekilde absorbe edilmesini engelleyerek ani ve gevrek kırılma eğilimine yol açmıştır. Bu sonuç, ince-uzun geometrinin hem eğme hem darbe testlerinde düşük performans göstermesiyle tutarlıdır.

Darbe dayanımı sonuçları yalnızca geometrik tasarımla değil, kabuk-çekirdek arayüzündeki yapışma kalitesi, üretim sırasında oluşan mikro-boşluklar, eksik dolum bölgeleri, yüzey düzensizlikleri gibi faktörlerle de yakından ilişkilidir. Bu tür kusurlar gerilme altında çatlak başlangıç noktaları oluşturduğu için darbe dayanımını özellikle ince-uzun ve yıldız yapılarda daha belirgin şekilde azaltmıştır. Bu nedenle darbe performansının optimize edilmesi hem uygun geometrik tasarımın hem de yüksek kalite yüzey hazırlığı ve kaplama işlemlerinin birlikte değerlendirilmesini gerektirir.



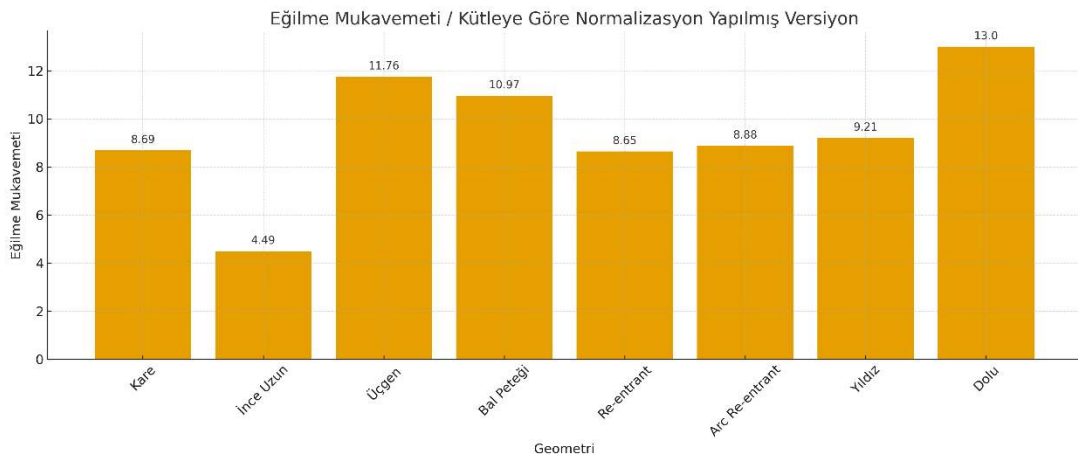
Şekil 3.6.Darbe Dayanımı sonuçları

3.3. Test Sonuçlarının Kütleye Göre Normalizasyonu

Önceki bölümlerde hücresel çekirdek geometrilerinin eğme dayanımı, eğme modülü, maksimum yer değiştirme, enerji, darbe dayanımı ve kütle gibi mutlak mekanik özellikleri ayrıntılı biçimde değerlendirilmiştir. Ancak yalnızca bu mutlak değerler üzerinden yapılacak yorumlar, farklı geometrideki çekirdeklerin gerçek mühendislik verimliliğini tam olarak ortaya koymamaktadır. Çünkü her geometri farklı miktarda malzeme tüketmekte, hücre duvar kalınlıkları, kolon uzunlukları ve hacimsel dağılımları birbirinden önemli ölçüde farklılık göstermektedir. Bu nedenle mutlak mukavemet veya rijitlik değerleri, yapının performansını yalnız başına tanımlamak için yeterli değildir.

Bu noktada, çekirdek topolojilerinin birim kütle başına ürettiği mekanik performansın değerlendirilmesi kritik önem taşımaktadır. Kütleye göre normalizasyon, hem hafiflik hem dayanım gerektiren mühendislik uygulamalarında en verimli geometrinin belirlenmesini sağlar. Böylece, yüksek mukavemet değerine sahip ancak ağır olan bir yapı ile daha düşük mukavemet üreten fakat çok hafif bir yapı arasında adil bir karşılaştırma yapmak mümkün hâle gelir. Normalizasyon sayesinde her geometri “kullandığı malzeme miktarı kadar” değerlendirilerek, çekirdeklerin özgül mekanik davranışı ve malzeme kullanım etkinliği ortaya konmaktadır.

Bu nedenle bu bölümde, deneysel verilerin kütle-normalize edilmiş eğilme mukavemeti, eğilme modülü ve darbe dayanımı grafiklerine odaklanılmış ve geometrilerin gerçek yapısal verimlilikleri ayrıntılı biçimde yorumlanmıştır.



Şekil 3.7. Eğilme Mukavemeti/Kütleye Göre Normalizasyon Yapılmış Versiyon

Şekil 3.1’de verilen normalize edilmemiş eğilme mukavemeti değerleri ile Şekil 3.7’de sunulan kütleye göre normalize edilmiş eğilme mukavemeti sonuçları birlikte değerlendirildiğinde, çekirdek geometrilerinin gerçek mekanik verimliliğini anlamak açısından önemli farklar ortaya çıkmaktadır. Normalizasyon, her yapının

yalnızca mutlak dayanımını değil, birim kütle başına ürettiği taşıyıcı kapasiteyi göstermesi açısından daha adil bir karşılaştırma imkânı sunmuştur.

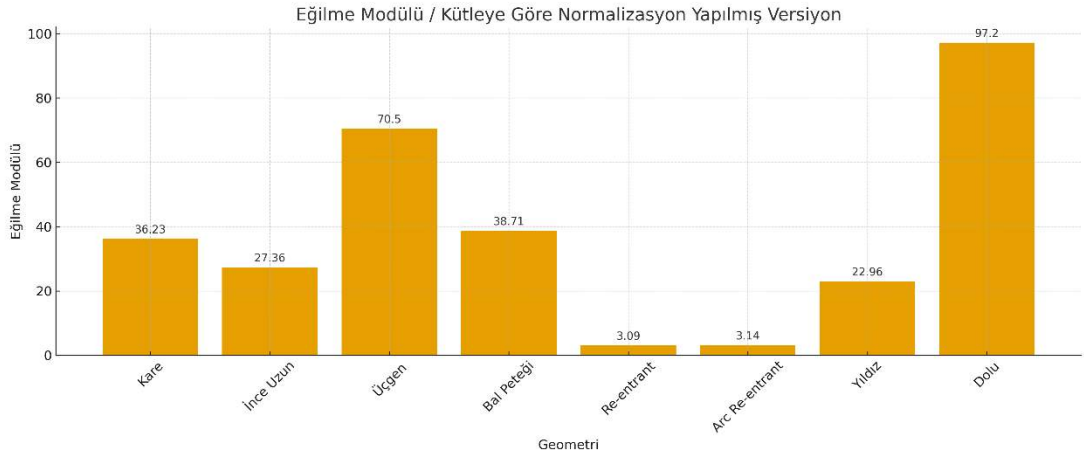
Normalize edilmemiş sonuçlarda üçgen (11,76 MPa) ve bal peteği (10,97 MPa) geometrileri en yüksek eğilme dayanımını göstermiş, onları kare (8,69 MPa), re-entrant (8,65 MPa), arc re-entrant (8,88 MPa) ve yıldız (9,21 MPa) yapılar izlemiştir. Bu sıralama geometrinin içsel taşıma mekanizmasına bağlıdır; özellikle üçgen ve bal peteği topolojilerinde yükün aksiyel doğrultuda ve düzenli düğümler aracılığıyla taşınması, bu yapıların yüksek dayanım göstermesine neden olmuştur. Ancak bu değerler, bu geometrilerin kaç gram malzeme kullanarak bu performansı elde ettiğini hesaba katmadığından, “gerçek verimlilik” açısından sınırlı bilgi sunmaktadır.

Kütle-normalize eğilme mukavemeti grafiğinde ise sıralama belirli ölçüde değişmiş; özellikle nispeten hafif geometrilerin birim kütle başına daha yüksek taşıma kapasitesi sunduğu görülmüştür. Üçgen yapı hem mutlak dayanımda hem de normalize sonuçlarda en yüksek verimi korumuştur; bu durum üçgensel topolojinin yalnızca güçlü değil, aynı zamanda malzeme kullanımında da son derece etkin olduğunu göstermektedir. Bal peteği geometrisi ise mutlak dayanımda üçgene yakın olsa da normalize sonuçlarda küçük bir düşüş göstermiştir. Bu durum, bal peteği yapısının ince hücre duvarları nedeniyle hafif olmasına rağmen bazı bölgelerde eğilme altındaki stabilitesinin daha sınırlı olmasından kaynaklanmaktadır.

Daha çarpıcı değişim kare, yıldız ve özellikle re-entrant ve arc re-entrant geometrilerinde görülmüştür. Normalize edilmemiş grafikte bu geometriler orta seviyede dayanım gösterirken, kütle-normalize grafikte verimlilikleri daha belirgin şekilde ortaya çıkmış ve bazıları beklenenden daha rekabetçi sonuçlar üretmiştir. Örneğin re-entrant ve arc re-entrant yapılar, öksatik karakterlerinin sağladığı şekil değiştirme kapasitesi sayesinde malzemeyi etkin kullanarak birim kütle başına beklenenden daha yüksek dayanım üretmiştir.

Diğer taraftan ince-uzun geometri hem normalize edilmemiş hem normalize edilmiş grafikte düşük performans göstermiştir. Bu durum, uzun ve ince kolonların burkulmaya yatkın olması nedeniyle yalnızca düşük dayanım sergilemesini değil, aynı zamanda ağırlık başına dayanım açısından da verimsiz olmasını açıklamaktadır.

Bu iki grafiğin karşılaştırmalı değerlendirmesi, çekirdek geometrisinin yalnızca dayanım açısından değil, hafiflik–dayanım dengesi açısından da optimize edilmesi gerektiğini göstermektedir. Normalize edilmemiş grafik mutlak dayanımı verirken, kütle-normalize grafik mühendislik uygulamalarında kritik olan özgül taşıma kapasitesini ortaya çıkarmıştır. Sonuç olarak üçgen ve bal peteği yapılar yüksek performans potansiyellerini korurken, öksatik temelli geometrilerin malzeme verimliliği açısından düşündüğünden daha avantajlı olduğu görülmüştür. Bu karşılaştırma, hafif ve dayanıklı çekirdek tasarımı yapılırken normalizasyonun neden kritik bir adım olduğunu net biçimde ortaya koymaktadır.



Şekil 3.8. Eğilme Modülü/Kütleye Göre Normalizasyon Yapılmış Versiyon

Şekil 3.2’de sunulan normalize edilmemiş eğilme modülü değerleri ile Şekil 3.8’de verilen kütle-normalize eğilme modülü sonuçları birlikte değerlendirildiğinde, hücresel çekirdek geometrilerinin elastik rijitlik açısından gerçek verimlilik sıralamasının önemli ölçüde değiştiği görülmektedir. Eğilme modülü, bir yapının elastik alandaki rijitliğini gösteren kritik bir parametre olsa da, farklı geometrilerin üretimi sırasında kullanılan malzeme miktarı değiştiği için mutlak değerler çoğu zaman malzeme verimliliği hakkında yanıltıcı olabilir. Bu nedenle modül değerlerinin kütleyle göre normalize edilmesi, yapının birim ağırlık başına sağladığı rijitliği ortaya çıkarması bakımından gereklidir.

Normalize edilmemiş sonuçlara bakıldığında üçgen (70,50 MPa) ve dolu yapı (97,20 MPa) açık ara en yüksek eğilme modülüne sahip olup, onları bal peteği (38,71 MPa), kare (36,23 MPa), ince-uzun (27,36 MPa), yıldız (22,96 MPa) ve oldukça düşük değerlere sahip re-entrant ve arc re-entrant geometrileri izlemektedir. Bu sıralama geometrinin temel taşıma mekanizmasını yansıtsa da geometrik farklılıklar nedeniyle her yapının rijitliği elde etmek için ne kadar malzeme kullandığı göz ardı edilmektedir.

Şekil 3.8’de verilen kütle-normalize eğilme modülü grafiği ise bu sıralamayı daha mühendislik odaklı bir bakışla yeniden düzenlemektedir. Normalize sonuçlarda üçgen yapı bir kez daha en yüksek performansı göstermiş ve yalnızca mutlak modül açısından değil, kullandığı birim malzeme başına sağladığı rijitlik bakımından da en verimli geometri olduğunu kanıtlamıştır. Üçgen topolojide kısa hücre duvarları ve güçlü düğüm sürekliliği, daha az malzeme ile daha yüksek rijitlik elde edilmesine olanak tanımaktadır. Bu nedenle üçgen yapı hem mutlak hem normalize verilerde tutarlı bir üstünlük sağlamıştır.

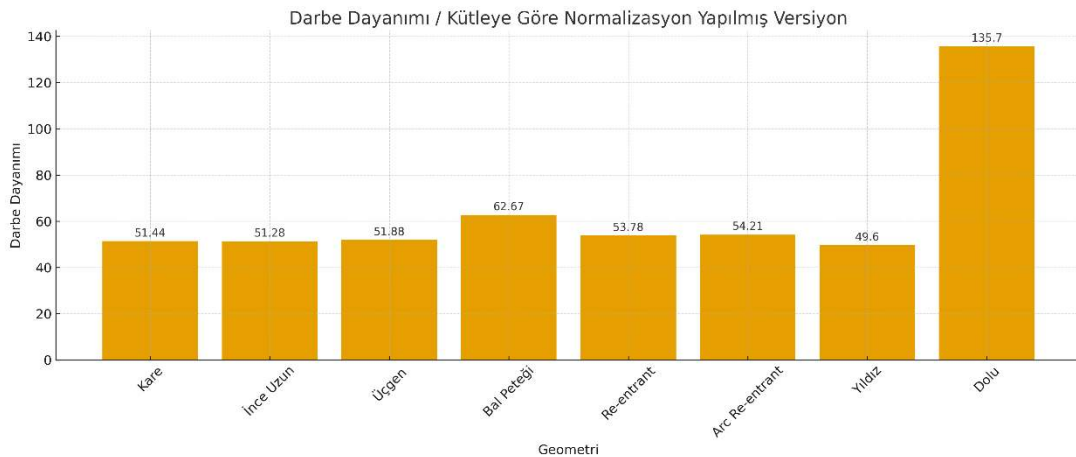
Bal peteği ve kare geometrileri normalize sonuçlarda da orta-yüksek seviyede performans göstermiştir. Her iki yapı da düzenli hücresel mimarisi sayesinde elastik deformasyona karşı kararlı davranmakta; fakat üçgen yapı kadar yüksek rijitlik verimliliği sunamamaktadır. Bunun nedeni, altıgen ve kare hücrelerde eğilme altındaki

yük aktarımının belirli bölgelerde daha düşük aksiyalite ile gerçekleşmesi ve üçgen yapıya kıyasla daha fazla malzeme kullanılmasıdır.

Özellikle dikkat çekici değişim re-entrant ve arc re-entrant yapılarda görülmektedir. Mutlak modül değerlerinde oldukça düşük seviyede olan bu öksatik geometriler, normalize edildiğinde bile diğer geometrilere kıyasla düşük rijitlik verimliliği göstermiştir. Bu durum, öksatik yapılarda elastik şekil değiştirmeye izin veren hücre açıları nedeniyle rijitlik üretiminin doğal olarak sınırlı olduğunu göstermektedir. Dolayısıyla re-entrant ve arc re-entrant yapılar ağırlık açısından avantajlı olsalar bile rijitlik gerektiren uygulamalar için uygun değildir.

Yıldız ve ince-uzun geometrileri ise normalize grafikte orta-alt seviyede konumlanmış ve rijitlik verimliliği bakımından üçgen, kare ve bal peteğine kıyasla daha düşük performans göstermiştir. Özellikle ince-uzun yapı, düşük modül değerini hafifliğine rağmen telafi edememiştir; uzun hücre kollarının elastik deformasyona karşı zayıf oluşu normalize edilmiş sonuçlara doğrudan yansımıştır.

Sonuç olarak, eğilme modülü grafiği ile kütle-normalize versiyonun karşılaştırılması, üçgen geometrinin yalnızca yüksek rijitlik sunmakla kalmayıp, bunu en verimli malzeme kullanımıyla gerçekleştirdiğini açıkça ortaya koymaktadır. Bal peteği ve kare yapılar dengeli bir performans sunarken, öksatik yapılar rijitlik açısından verimsizdir. Bu karşılaştırma, rijitlik odaklı hafif yapı tasarımlarında geometrik optimizasyonun kritik önemini göstermektedir ve çekirdek seçiminin yalnızca mutlak performansla değil, özgül rijitlik kriteriyle değerlendirilmesinin gerekliliğini vurgulamaktadır.



Şekil 3.9. Darbe Dayanımı/Kütleye Göre Normalizasyon Yapılmış Versiyon

Şekil 3.6’da verilen normalize edilmemiş darbe dayanımı (enerji/alan) değerleri ile Şekil 3.9’da sunulan kütle-normalize darbe dayanımı sonuçları birlikte değerlendirildiğinde, hücresel çekirdek geometrilerinin darbe altındaki gerçek enerji absorpsiyon verimliliğinin malzeme kullanımına bağlı olarak önemli ölçüde değiştiği görülmektedir. Mutlak darbe dayanımı, yapının darbe altındaki maksimum direnç

seviyesini gösterse de, farklı geometrilerin üretimi sırasında tüketilen malzeme miktarları birbirinden ciddi şekilde farklı olduğundan, bu mutlak değerler her zaman doğru bir karşılaştırma sunmamaktadır. Bu nedenle darbe dayanımının kütleye göre normalize edilmesi, birim ağırlık başına sönmölen enerji miktarını ortaya koyarak yapının gerçek yapısal verimliliğini daha objektif biçimde değerlendirmeyi mümkün kılar.

Normalize edilmemiş darbe dayanımı sonuçlarında üçgen yapı (25,1 kJ/m²) en yüksek dayanımı göstermiş, onu sırasıyla re-entrant (23,0 kJ/m²), arc re-entrant (22,1 kJ/m²), kare (21,3 kJ/m²), bal peteği (20,8 kJ/m²), yıldız (20,2 kJ/m²) ve ince-uzun (19,4 kJ/m²) yapı izlemiştir. Bu sıralamada darbe yükünün hücre duvarlarına nasıl yayıldığı, gerilme odaklarının nerede oluştuğu ve her yapının kırılmadan önce ne kadar şekil değiştirme kapasitesi sunduğu belirleyici olmuştur. Ancak bu sonuçlar, geometrilerin kütle farklılıklarını hesaba katmadığından, yapının darbe altındaki “özgül dayanımı” hakkında sınırlı bilgi sağlamaktadır.

Kütle-normalize darbe dayanımı grafiğinde bu sıralama belirli ölçüde değişmiş; özellikle hafif geometrilerin malzeme kullanımındaki etkinliği belirgin hâle gelmiştir. Üçgen yapı normalize sonuçlarda da yüksek performans göstermeye devam etmiş; bu durum yalnızca dayanım açısından değil, birim kütle başına enerji sönmöleme kapasitesi bakımından da en verimli topoloji olduğunu ortaya koymuştur. Üçgen yapının kısa ve sağlam kolonları, hem mutlak darbe dayanımı hem de özgül darbe dayanımında tutarlı bir üstünlük sağlamıştır.

Önemli bir bulgu, bal peteği ve kare geometrilerinin normalize sonuçlarda konumunun değişmesidir. Mutlak darbe dayanımında orta seviyede yer alan bu iki yapı, normalize değerlerde nispeten daha avantajlı bir konuma gelmiştir. Bal peteği geometrisinin düşük kütleyle sahip olması, birim ağırlık başına darbe dayanımının beklenenden daha yüksek çıkmasına yol açmıştır. Kare yapıda ise dört yönlü simetri darbe yükünü nispeten dengeli dağıttığından, normalize edildiğinde görece bir performans kazanımı gözlenmiştir.

Re-entrant ve arc re-entrant yapılar, normalize edilmemiş grafikte üçgene yakın dayanım göstermelerine rağmen normalize sonuçlarda bu avantajlarını kısmen kaybetmiştir. Bunun nedeni, öksatik geometrilerin hücre kollarında daha fazla malzeme birikmesine yol açan ters aç düzenidir. Dolayısıyla bu yapılar yüksek şekil değiştirme kapasitesine sahip olsalar da, kütle başına enerji sönmöleme verimliliği üçgen ve bal peteği gibi hafif yapılara göre daha sınırlı kalmıştır.

Yıldız ve ince-uzun geometriler ise normalize grafiklerde de düşük seviyede performans göstermiştir. Yıldız yapıda keskin uçların gerilme yoğunluğu oluşturması, ince-uzun yapıda ise burkulma eğilimi yüksek kolonların enerjiyi verimli bir şekilde absorbe edememesi, bu yapıların özgül darbe dayanımının sınırlı kalmasına yol açmıştır.

Sonuç olarak, darbe dayanımı ile kütle-normalize darbe dayanımı grafiklerinin karşılaştırılması, yüksek mutlak darbe dayanımı gösteren geometrilerin her zaman en yüksek özgül dayanımı sunmadığını, dolayısıyla malzeme kullanım verimliliğinin tasarım kararlarında belirleyici bir parametre olduğunu göstermektedir. Üçgen yapı hem mutlak hem normalize performansta üstünlüğünü korurken, bal peteği ve kare gibi hafif geometriler normalize sonuçlarda beklenenden daha rekabetçi hale gelmiştir. Buna karşılık öksatik yapılar darbe dayanımında avantajlı görünse de, kütle-normalize değerlerde bu avantajları kısmen gerilemiştir. Bu bulgular, darbe yükleri altında optimum performans için yalnızca dayanımın değil, ağırlık–dayanım oranının da dikkate alınması gerektiğini açıkça ortaya koymaktadır.

3.4. Test Sonuçlarının Tablosal Gösterimi

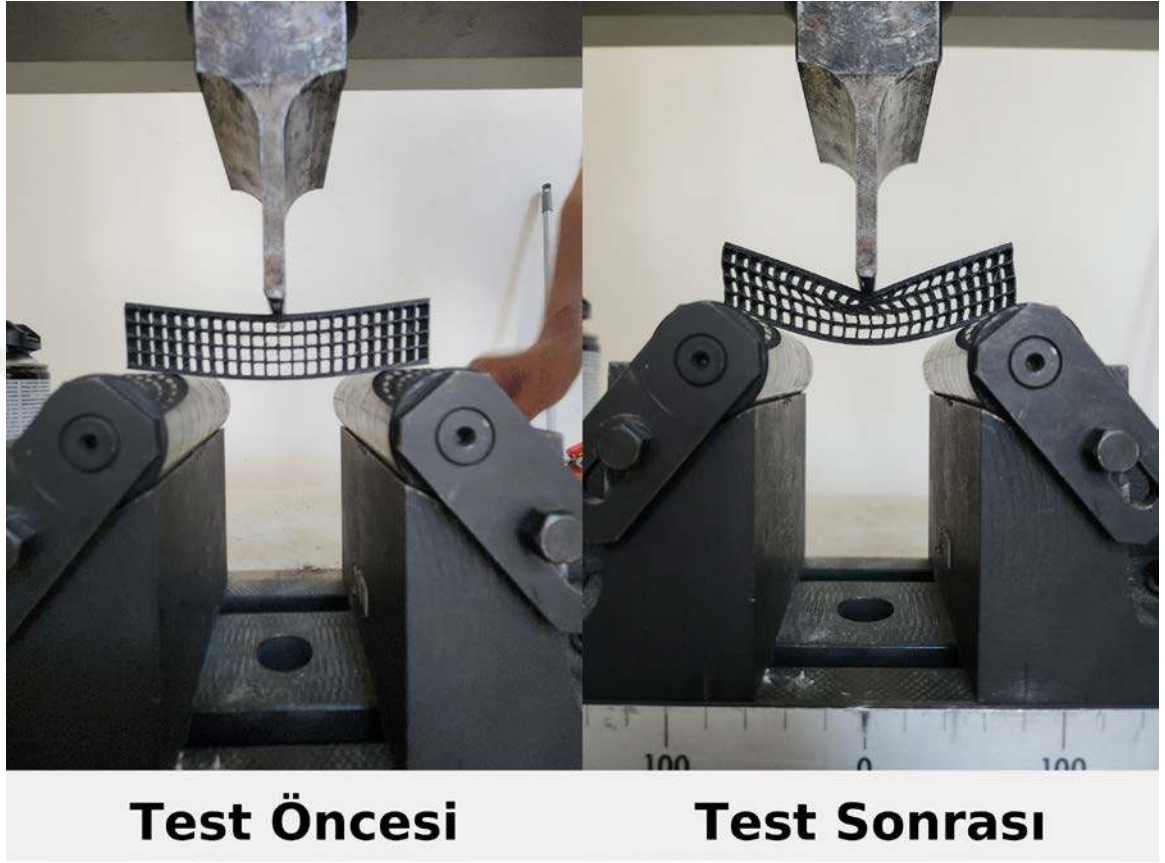
Tablo 3.1’de farklı geometriler için elde edilen tüm mekanik test sonuçları özetlenmiştir. Değerler üç tekrarlı deneylerin ortalamalarıdır.

Tablo 3.1.Farklı geometrilerin mekanik test sonuçları

Geometri	Eğme Mukavemeti (MPa)	Eğme Modülü (MPa)	Maks. Yer Değiştirme (mm)	Kütle (g)	Charpy Enerji (J)	Darbe Dayanımı (kJ/m ²)
Kare	3,60	15	16,9	9,73	5,99	21,30
İnce Uzun	1,70	10,35	22,39	8,89	4,28	19,40
Üçgen	5,69	34,11	9,07	11,37	15,42	25,10
Bal Peteği	3,64	12,85	21	7,8	5,45	20,80
Re-entrant	3,70	1,32	11,95	10,05	4,92	23,00
Arc Re-entrant	3,62	1,28	12,51	9,58	5,05	22,10
Yıldız	3,75	9,35	16,39	9,57	5,36	20,20
Dolu	13,00	97,20	8,67	23,50	29,54	135,70

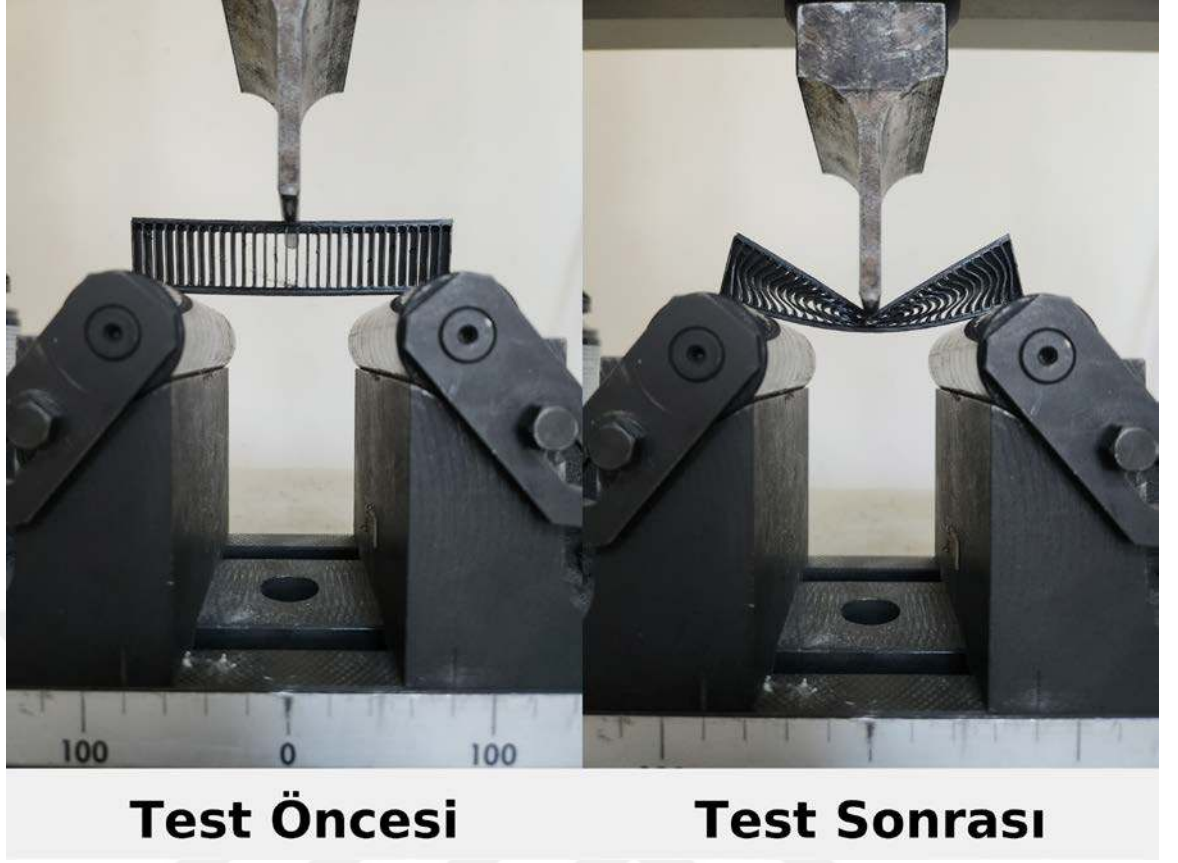
3.5. Test Aşamalarına Ait Fotoğraflar

Kare geometrisi test öncesi ve sonrası görsellerde (Şekil 3.7) açıkça görülebilmektedir. Test sonrası görüntülerde hücre duvarlarının kırılma ve burkulma davranışı belirgindir. Bu davranış grafik sonuçlarıyla uyumlu olup, Kare yapısının mekanik özelliklerini doğrulamaktadır.



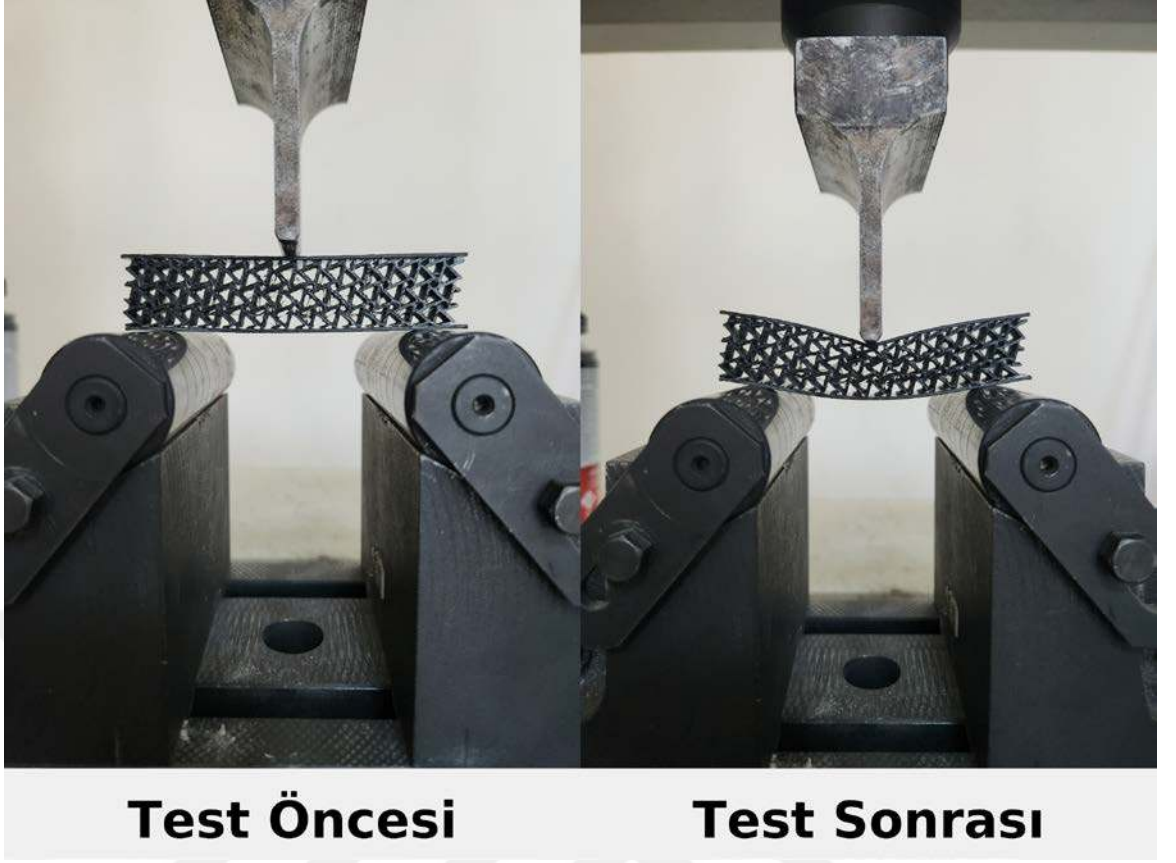
Şekil 3.10. Kare çekirdek yapısı test öncesi ve sonrası

İnce Uzun geometrisi test öncesi ve sonrası görsellerde (Şekil 3.8) açıkça görülebilmektedir. Test sonrası görüntülerde hücre duvarlarının kırılma ve burkulma davranışı belirgindir. Bu davranış grafik sonuçlarıyla uyumlu olup, İnce Uzun yapısının mekanik özelliklerini doğrulamaktadır.



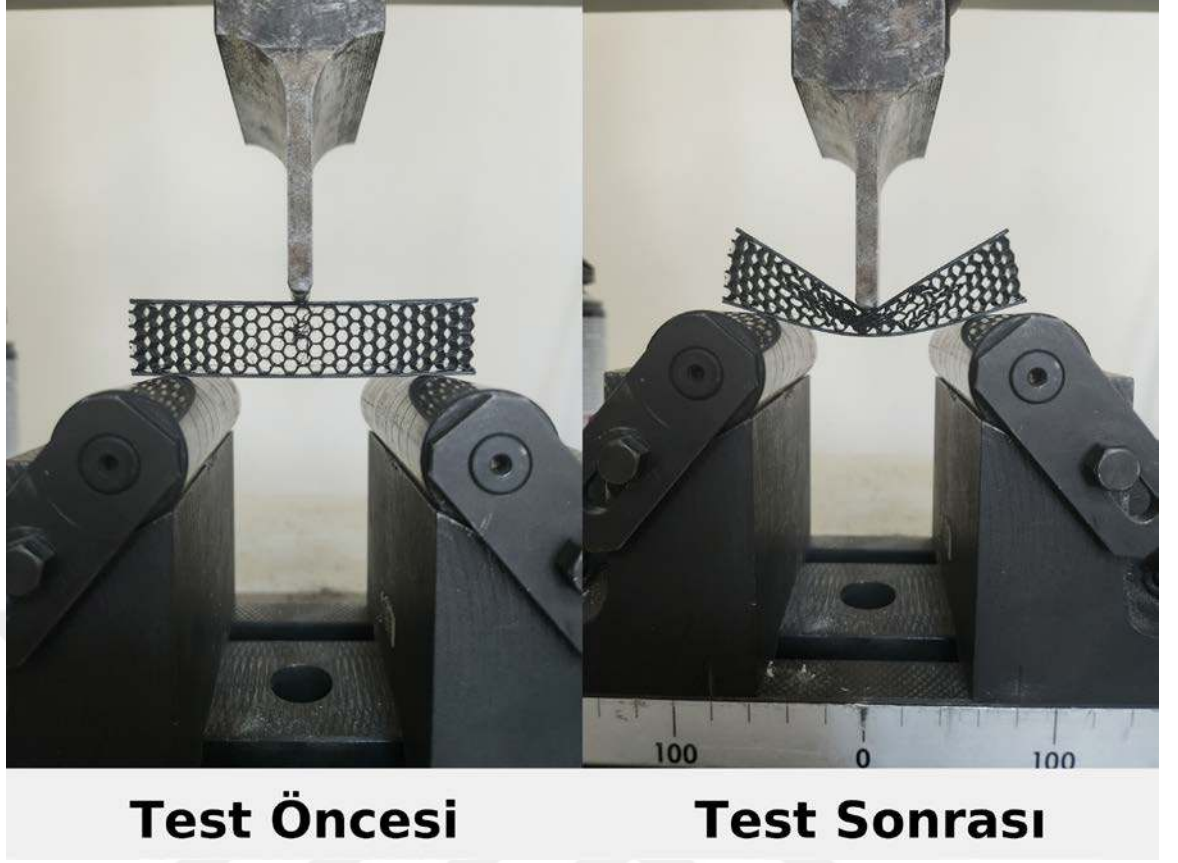
Şekil 3.11. İnce Uzun çekirdek yapısı test öncesi ve sonrası

Üçgen geometrisi test öncesi ve sonrası görsellerde (Şekil 3.9) açıkça görülebilmektedir. Test sonrası görüntülerde hücre duvarlarının kırılma ve burkulma davranışı belirgindir. Bu davranış grafik sonuçlarıyla uyumlu olup, Üçgen yapısının mekanik özelliklerini doğrulamaktadır.



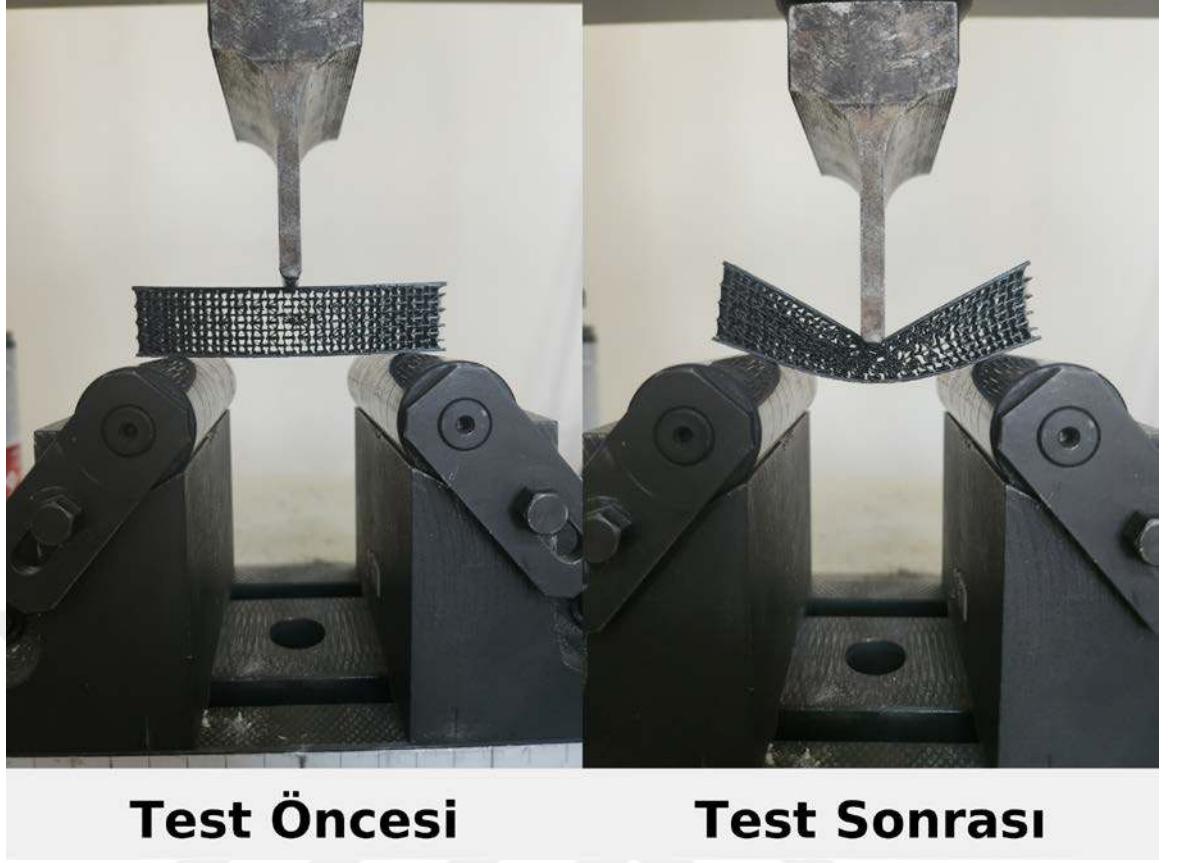
Şekil 3.12.Üçgen çekirdek yapısı test öncesi ve sonrası

Bal Peteği geometrisi test öncesi ve sonrası görsellerde (Şekil 3.10) açıkça görülebilmektedir. Test sonrası görüntülerde hücre duvarlarının kırılma ve burkulma davranışı belirgindir. Bu davranış grafik sonuçlarıyla uyumlu olup, Bal Peteği yapısının mekanik özelliklerini doğrulamaktadır.



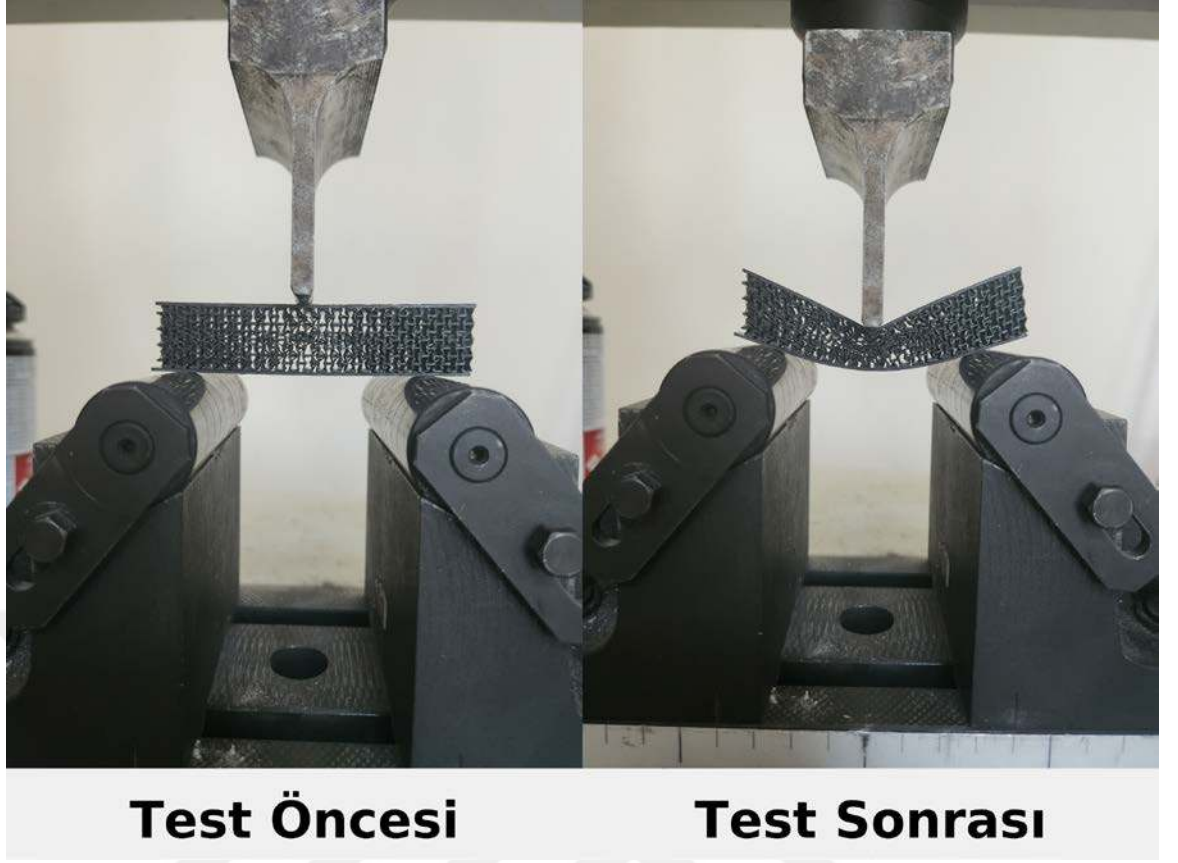
Şekil 3.13.Bal Peteği çekirdek yapısı test öncesi ve sonrası

Re-entrant geometrisi test öncesi ve sonrası görsellerde (Şekil 3.11) açıkça görülebilmektedir. Test sonrası görüntülerde hücre duvarlarının kırılma ve burkulma davranışı belirgindir. Bu davranış grafik sonuçlarıyla uyumlu olup, Re-entrant yapısının mekanik özelliklerini doğrulamaktadır.



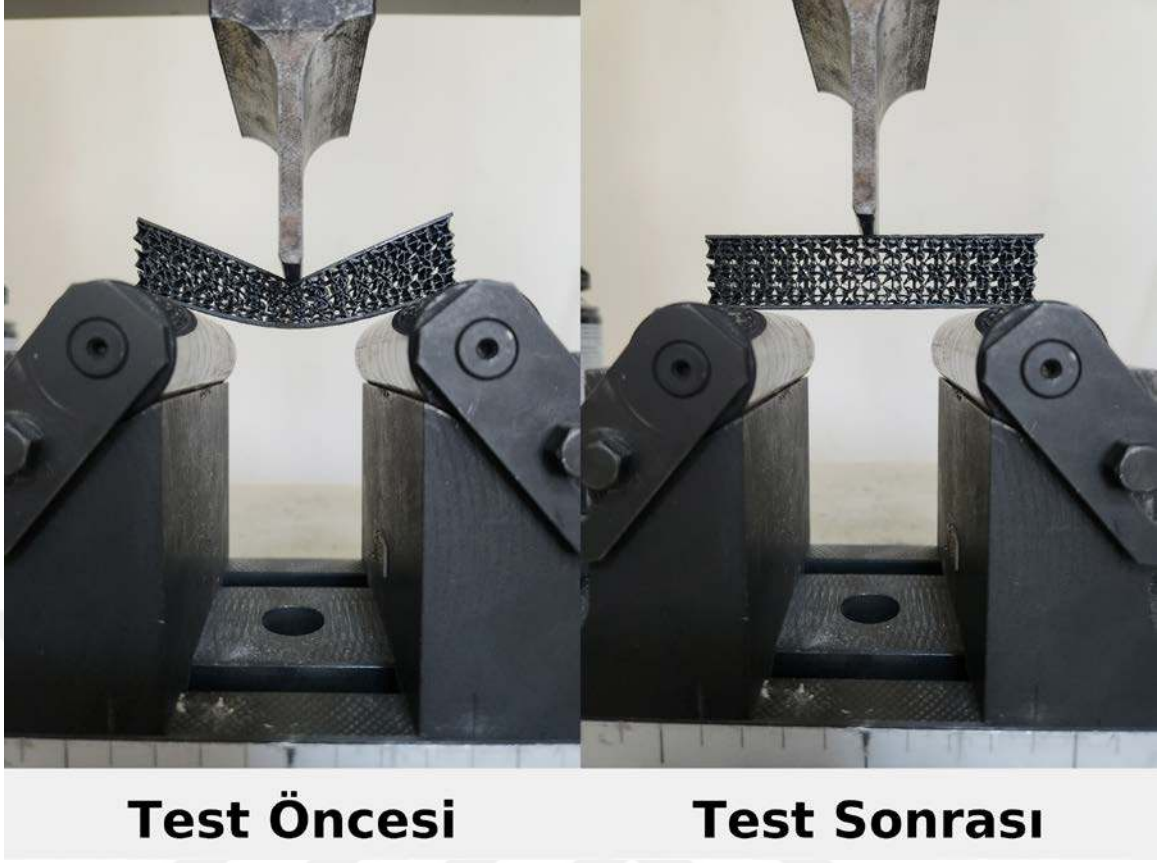
Şekil 3.14.Re-entrant çekirdek yapısı test öncesi ve sonrası

Arc Re-entrant geometrisi test öncesi ve sonrası görsellerde (Şekil 3.12) açıkça görülebilmektedir. Test sonrası görüntülerde hücre duvarlarının kırılma ve burkulma davranışı belirgindir. Bu davranış grafik sonuçlarıyla uyumlu olup, Arc Re-entrant yapısının mekanik özelliklerini doğrulamaktadır.



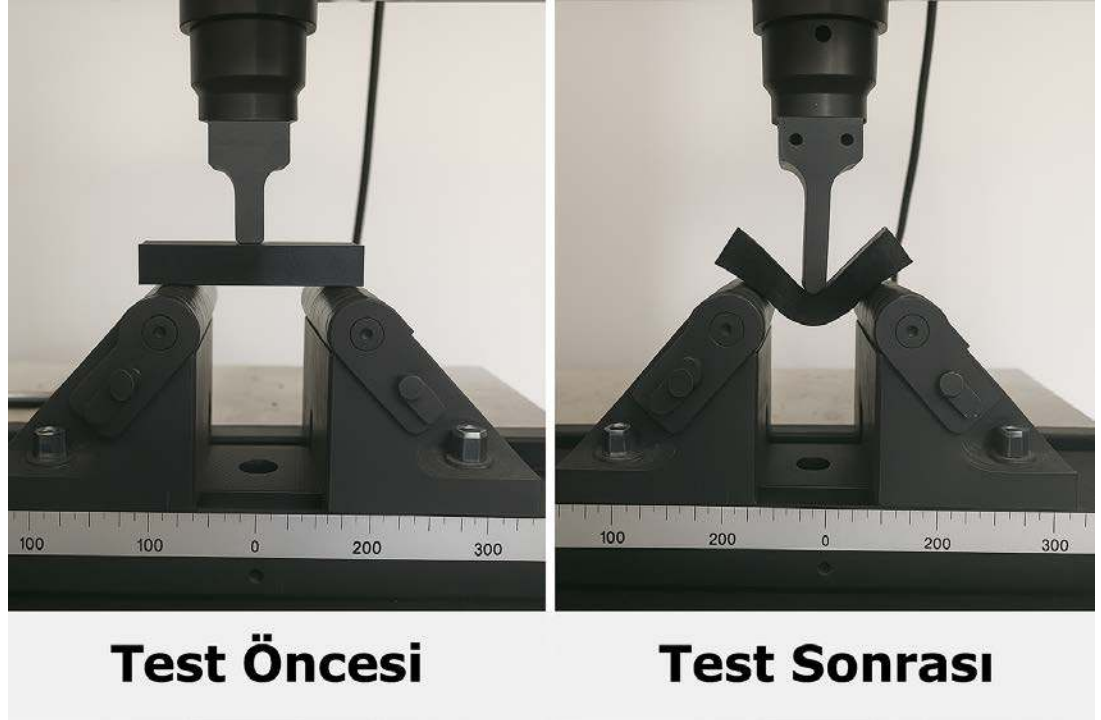
Şekil 3.15.Arc Re-entrant çekirdek yapısı test öncesi ve sonrası

Yıldız geometrisi test öncesi ve sonrası görsellerde açıkça görülebilmektedir. Test sonrası görüntülerde hücre duvarlarının kırılma ve burkulma davranışı belirgindir. Bu davranış grafik sonuçlarıyla uyumlu olup, Yıldız yapısının mekanik özelliklerini doğrulamaktadır



Şekil 3.16.Yıldız çekirdek yapısı test öncesi ve sonrası

Dolu geometrinin test öncesi ve sonrası görsellerde açıkça görülebilmektedir.



Şekil 3.17.Dolu çekirdek yapısı test öncesi ve sonrası

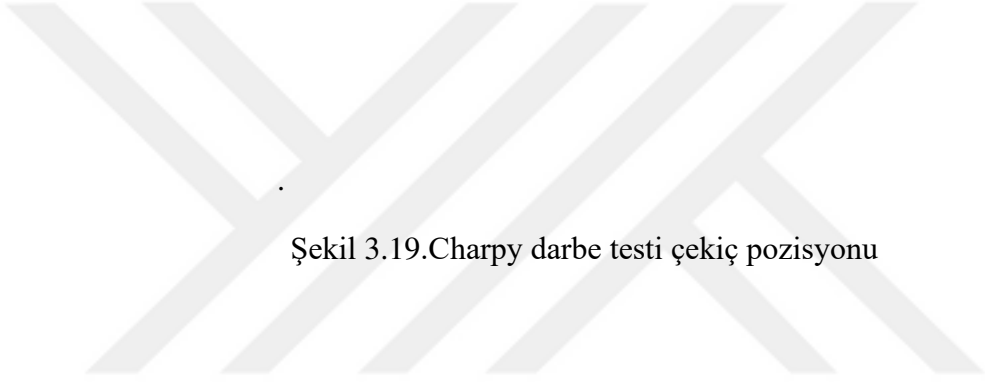
Şekil 3.18, Charpy darbe testi sırasında numunenin test düzeneği üzerindeki konumunu göstermektedir. Numune, darbe test cihazının destek çeneleri arasına yatay olarak, serbest açıklığı ortalayacak şekilde yerleştirilmiştir. Bu konumlandırma, çekiç darbesinin tam olarak numunenin orta noktasına etki etmesini ve enerjinin tek bir kesit üzerinden iletilmesini sağlamaktadır.

Numune, sandviç kompozit yapının geometrik simetrisini koruyacak biçimde, dış yüzey kabuklarının darbe yönüne dik olacak şekilde yerleştirilmiştir. Böylece darbe enerjisinin önce dış kabuğa, ardından çekirdek yapıya aktarılması ve oluşan hasarın katmanlar arası enerji sönmüleme mekanizması üzerinden incelenmesi hedeflenmiştir. Bu pozisyon, darbe altındaki deformasyon davranışını ve kırılma modlarını (eğilme, kesme, delaminasyon) daha net gözlemlemeye olanak tanımaktadır.

Bu şekilde yapılan konumlandırma, ASTM D6110 standardına uygun olarak, numunenin sabit açıklık üzerinde tek darbe etkisi altında kırılması esasına dayanmaktadır. Testin amacı, çekirdek geometrisinin ve doluluk oranının darbe dayanımı üzerindeki etkisini değerlendirmektir.



Şekil 3.18.Charpy darbe testi numune pozisyonu



Şekil 3.19.Charpy darbe testi çekiç pozisyonu

4. SONUÇ ve DEĞERLENDİRME

Bu tez çalışmasında, eklemeli imalat ile üretilmiş termoplastik poliüretan (TPU) çekirdek yapılarının, karbon fiber takviyeli epoksi kabuklarla oluşturulan hibrit sandviç kirişlerin mekanik performansına etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Çalışmanın temel amacı, farklı hücresel geometrilere sahip çekirdeklerin eğme davranışı, rijitlik özellikleri, darbe dayanımı ve özgül mekanik performans üzerindeki etkilerini karşılaştırmalı olarak ortaya koymaktır. Bu kapsamda kare, ince-uzun, üçgen, bal peteği, re-entrant, arc re-entrant ve yıldız biçimli toplam yedi farklı çekirdek topolojisi aynı üretim koşulları altında hazırlanmış; böylece performans farklılıklarının yalnızca geometrik tasarımdan kaynaklanması sağlanmıştır.

Dolu numune ise çekirdek geometrilerinin değerlendirilmesinde referans amacıyla kullanılmıştır. Dolu yapının görelî olarak çok daha yüksek eğme dayanımı, eğilme modülü ve darbe direnci göstermesi beklenen bir durumdur; ancak yüksek malzeme kullanımı ve artan ağırlığı nedeniyle mühendislik uygulamaları için özgül performans açısından karşılaştırmalı bir ölçüt sunmaz. Bu nedenle dolu numune, diğer tüm topolojilerin davranışını mutlak bir mekanik sınır olarak değerlendirmek ve hücresel yapılarda malzeme-ekonomi-performans ilişkisini doğru şekilde analiz edebilmek için referans olarak ele alınmıştır.

Elde edilen eğme testi sonuçları değerlendirildiğinde, üçgensel çekirdek yapısının en yüksek eğilme mukavemetine sahip olduğu görülmüştür. Üçgenlerin aksiyel yük taşıma kapasitesinin yüksek oluşu, düğüm sürekliliğinin iyi olması ve yapısal stabilitenin güçlü olması bu sonucu desteklemektedir. Bal peteği ve kare geometrileri orta-yüksek seviyede performans göstermiş; ince-uzun ve yıldız yapılar ise düşey kolonlarının burkulmaya yatkınlığı ve bazı birleşim bölgelerindeki üretim kusurları nedeniyle daha düşük eğme dayanımı sunmuştur. Re-entrant ve arc re-entrant yapılarda eğme dayanımı orta seviyede olup öksatik karakterin neden olduğu yerel şekil değiştirme mekanizmaları dayanımı sınırlamıştır.

Eğilme modülü sonuçları da benzer bir eğilim göstermiş, üçgen geometrisi en yüksek elastik rijitliği sunarken, onu bal peteği, kare ve öksatik yapılar takip etmiştir. İnce-uzun yapı ise düşük kesit rijitliği nedeniyle en düşük modülü göstermiştir. Bu bulgular, rijitliğin doğrudan kolonların sürekliliğine, kesit stabilitesine ve hücre topolojisinin yük aktarım yoluna bağlı olduğunu ortaya koymaktadır.

Maksimum yer değiştirme değerleri şekil değiştirme kapasitesini göstermesi açısından önemli olup, üçgen ve kare gibi rijit yapılar minimum yer değiştirme sergilerken, ince-uzun ve bal peteği yapıların daha yüksek deformasyon gösterdiği gözlenmiştir. Bu durum, rijitlik-dayanım-deformasyon ilişkisinin topolojik tasarım ile doğrudan bağlantılı olduğunu doğrulamaktadır.

Charpy darbe testi sonuçları değerlendirildiğinde üçgensel yapı en yüksek darbe enerjisini absorbe etmiş; onu re-entrant ve arc re-entrant öksatik yapılar takip etmiştir. Kare, bal peteği ve yıldız geometrileri orta seviyede performans sunarken, ince-uzun yapı en düşük darbe enerjisi değerini göstermiştir. Bu sonuç, kolonların darbe anındaki lokal kırılma modlarının geometriye duyarlı olduğunu ve öksatik mekanizmanın belirli bir düzeyde enerji absorpsiyon kapasitesi sunduğunu göstermektedir.

Darbe dayanımı (enerji/alan) açısından da benzer bir sıralama görülmüş; üçgen yapı en yüksek dayanımı sergilerken, öksatik yapılar bunun biraz altında ancak hâlâ yüksek kabul edilen değerler göstermiştir. Bal peteği, kare ve yıldız geometrileri orta düzeyde performans sunmuş; ince-uzun yapı ise düşük darbe dayanımı ile en alt seviyede yer almıştır.

Bu tezde ayrıca, mekanik performansın kütleyle göre normalize edilmesi yoluyla özgül performans değerlendirmesi yapılmıştır. Eğilme mukavemeti/kütle, eğilme modülü/kütle ve darbe dayanımı/kütle oranları incelendiğinde bazı sonuçların sıralamasının değiştiği görülmüştür. Örneğin bal peteği yapısı, düşük kütlesi sayesinde özgül darbe dayanımında kayda değer avantaj sağlamıştır. Buna karşılık üçgen yapı hâlâ yüksek özgül performans sunmakla birlikte, kütle-normalizasyonu sonrası bazı geometriler ile fark azalmıştır. Öksatik yapılar ise geometrik avantajlarını özgül performansa da belirli ölçüde yansıtmıştır. Bu durum, mühendislik tasarımında sadece mutlak mekanik değerlerin değil, yapının ağırlık maliyetinin de önemli bir tasarım kriteri olduğunu göstermektedir.

Test aşamalarına ait görseller, elde edilen grafiksel verileri desteklemekte olup, özellikle ince-uzun ve yıldız yapıların erken burkulma ve lokal kırılma gösterdiği; üçgen ve bal peteği yapılarda ise yükün daha homojen dağıldığı görülmüştür. Charpy darbe testi sırasında hücre duvarlarının kırılma modları, topolojik tasarımın enerji yutma mekanizmalarına etkisini açık bir şekilde ortaya koymaktadır.

Genel olarak değerlendirildiğinde, üçgensel topoloji hem eğme hem rijitlik hem de darbe dayanımı açısından en yüksek performansı göstererek hibrit sandviç yapılarda optimum çekirdek geometrisi olduğunu kanıtlamıştır. Bal peteği, kare ve öksatik yapılar da optimum özgül performans gerektiren hafiflik odaklı uygulamalarda potansiyel sunmaktadır. İnce-uzun ve yıldız geometrileri ise yüksek deformasyon kapasitesi gerektiren ancak düşük dayanımın tolere edilebileceği senaryolara uygun olabilir.

Bu çalışmanın katkısı üç temel başlık altında özetlenebilir: (1) Farklı geometri türlerinin aynı üretim koşulları altında karşılaştırılması, hangi uygulama için hangi yapının uygun olduğunu doğrudan ortaya koymuştur. (2) Şekil değiştirme, enerji absorpsiyonu ve rijitlik gibi kriterlerin yalnızca malzeme ile değil, geometri ile birlikte değerlendirilmesi gerektiği deneysel verilerle gösterilmiştir. (3) Elde edilen sonuçlar,

hafiflik, rijitlik ve darbe dayanımı arasında denge arayan havacılık, savunma, otomotiv ve yapı sektörlerinde tasarımcılar için yol gösterici niteliktedir.

Sonuç olarak bu tez, çekirdek geometrisi ile mekanik performans arasındaki ilişkiyi çok boyutlu olarak ele almış, hem literatürdeki sınırlı karşılaştırmalı çalışmaları genişletmiş hem de endüstriyel uygulamalar için doğrudan kullanılabilir tasarım verileri sunmuştur. Gelecek çalışmalarda farklı çekirdek malzemeleri, üretim parametreleri, yorulma davranışı ve sınır koşullarının etkisi de incelenerek bu araştırma daha da genişletilebilir. Ancak mevcut haliyle bu çalışma hem akademik literatüre katkı sağlayan hem de mühendislik uygulamalarına yön veren nitelikte özgün bir araştırma olarak değerlendirilmelidir.



5. KAYNAKLAR

1. Al Hassanieh, S., Ngo, T. D., Tran, P., & Xia, Z. (2021). Mechanical Properties and Energy Absorption of Novel Re-Entrant Plate Lattice Structures. *Metals*, 11(11), 1802.
2. ASTM International. (2017). ASTM D790-17: Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials.
3. <https://www.astm.org/d0790-17.html> ASTM International. (2018). ASTM D6110-18: Standard Test Method for Determining the Charpy Impact Resistance of Notched Specimens of Plastics. <https://www.astm.org/d6110-18.html>
4. Barbero, E. J. (2013). Finite element analysis of composite materials. CRC Press.
5. Bitzer, T. (1997). Honeycomb Technology: Materials, Design, Manufacturing, Applications and Testing. Springer.
6. Campbell, F. C. (2010). Structural composite materials. ASM International.
7. Chand, S. (2000). Carbon fibers for composites. *Journal of Materials Science*, 35(6), 1303–1313.
8. Chawla, K. K. (2012). Composite materials: Science and engineering (3rd ed.). Springer Science & Business Media.
9. Ciferri, A. (2005). Supramolecular Polymers. CRC Press.
10. Daniel, I. M., & Ishai, O. (2006). Engineering mechanics of composite materials (2nd ed.). Oxford University Press.
11. Faruk, O., Bledzki, A. K., Fink, H. P., & Sain, M. (2012). Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000–2010. *Progress in Polymer Science*, 37(11), 1552–1596.
12. Gibson, I., Rosen, D. W., & Stucker, B. (2015). Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing. Springer.
13. Gibson, L. J. (2016). The hierarchical structure and mechanics of plant materials. *Journal of the Royal Society Interface*, 9(76), 2749–2766.
14. Gibson, L. J., & Ashby, M. F. (1997). Cellular Solids: Structure and Properties (2nd ed.). Cambridge University Press.
15. Hull, D., & Clyne, T. W. (1996). An introduction to composite materials (2nd ed.). Cambridge University Press.

16. Kaczmar, J. W., Pietrzak, K., & Rusiński, E. (2000). The production and application of metal matrix composite materials. *Journal of Materials Processing Technology*, 106(1-3), 58–67.
17. Kaw, A. K. (2005). *Mechanics of composite materials* (2nd ed.). CRC Press.
18. La Rosa, A. D., Banatao, D. R., Pastine, S. J., Latteri, A., & Cicala, G. (2016). Recycling treatment of carbon fibre/epoxy composites: Materials recovery and characterization and environmental impacts through life cycle assessment. *Composites Part B: Engineering*, 104, 17-25.
19. Li, T., Chen, Y., Hu, X., & Fan, H. (2020). Energy absorption of auxetic re-entrant lattices. *International Journal of Mechanical Sciences*, 175, 105476.
20. Liu, W., Zhang, D., & Wang, X. (2012). Properties of epoxy resin composites. *Composites Part B: Engineering*, 43(2), 576-582.
21. Long, A. C. (2005). *Design and Manufacture of Textile Composites*. Woodhead Publishing.
22. Maconachie, T., Leary, M., Lozanovski, B., Zhang, X., Qian, M., Faruque, O., & Brandt, M. (2019). SLM lattice structures: Properties, performance, applications and challenges. *Materials & Design*, 183, 108137.
23. Mallick, P. K. (2007). *Fiber-reinforced composites: Materials, manufacturing, and design* (3rd ed.). CRC Press.
24. Mazumdar, S. K. (2001). *Composites manufacturing: Materials, product, and process engineering*. CRC Press.
25. Naslain, R. (2004). Design, preparation and properties of non-oxide CMCs for application in engines and nuclear reactors: an overview. *Composites Science and Technology*, 64(2), 155–170.
26. Ngo, T. D., et al. (2018). Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Composites Part B: Engineering*, 143, 172-196.
27. Oliveux, G., Dandy, L. O., & Leeke, G. A. (2015). Current status of recycling of fibre reinforced polymers: Review of technologies, reuse and resulting properties. *Progress in Materials Science*, 72, 61-99.
28. Pickering, S. J. (2006). Recycling technologies for thermoset composite materials—current status. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 37(8), 1206-1215.
29. Sigmund, O., & Maute, K. (2013). Topology optimization approaches. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 48(6), 1031-1055.
30. Soutis, C. (2005). Carbon fiber reinforced plastics in aircraft construction. *Materials Science and Engineering: A*, 412(1-2), 171–176.

31. Vinson, J. R. (1999). The behavior of sandwich structures of isotropic and composite materials. Routledge.
32. Zenkert, D. (1997). The handbook of sandwich construction. Engineering Materials Advisory Services Ltd.
33. Zok, F. W., Waltner, S. A., Wei, Z., Evans, A. G., & McMeeking, R. M. (2004). A protocol for characterizing the structural performance of metallic sandwich panels: Application to pyramidal truss cores. *International Journal of Solids and Structures*, 41(22–23), 6249–6271.
34. Fam, A., Sharaf, T. 2010. "Flexural performance of sandwich panels comprising polyurethane core and GFRP skins and ribs of various configurations". *Composite Structures*, 92(12), 2927-2935.
35. Karsandik, Y., Sabuncuoglu, B., Yildirim, B., Silberschmidt, V. V. 2023, Haziran 15. "Impact behavior of sandwich composites for aviation applications: A review". *Composite Structures*. Elsevier Ltd.
36. Yang, B., Wang, Z., Zhou, L., Zhang, J., Tong, L., Liang, W. 2015. "Study on the low-velocity impact response and CAI behavior of foam-filled sandwich panels with hybrid facesheet". *Composite Structures*, 132, 1129-1140.
37. Zhang, D., Fei, Q., Zhang, P. 2017. "Drop-weight impact behavior of honeycomb sandwich panels under a spherical impactor". *Composite Structures*, 168, 633-645.
38. Zhang, G., Wang, B., Ma, L., Xiong, J., Yang, J., Wu, L. 2013. "The residual compressive strength of impact-damaged sandwich structures with pyramidal truss cores". *Composite Structures*, 105, 188-198.
39. Zhang, J., Supernak, P., Mueller-Alander, S., Wang, C. H. 2013. "Improving the bending strength and energy absorption of corrugated sandwich composite structure". *Materials & Design (1980-2015)*, 52, 767-773.
40. Zhang, T., Yan, Y., Li, J., Luo, H. 2016. "Low-velocity impact of honeycomb sandwich composite plates". *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 35(1), 8-32.
41. Zhang, Z., Zhang, Q., Zhang, D., Li, Y., Jin, F., Fang, D. 2020. "Enhanced mechanical performance of brazed sandwich panels with high density square honeycomb-corrugation hybrid cores". *Thin-Walled Structures*, 151, 106757.
42. Akatay, A., Bora, M. Ö., Çoban, O., Fidan, S., Tuna, V. 2015. "The influence of low velocity repeated impacts on residual compressive properties of honeycomb sandwich structures". *Composite Structures*, 125, 425-433.
43. Aryal, B., Morozov, E. V., Wang, H., Shankar, K., Hazell, P. J., Escobedo-Diaz, J. P. 2019. "Effects of impact energy, velocity, and impactor mass on the damage induced in composite laminates and sandwich panels". *Composite Structures*, 226, 111284.
44. Bai, R., Guo, J., Lei, Z., Liu, D., Ma, Y., Yan, C. 2019. "Compression after impact behavior of composite foam-core sandwich panels". *Composite Structures*, 225, 111181.

45. Crupi, V., Epasto, G., Guglielmino, E. 2012. "Collapse modes in aluminium honeycomb sandwich panels under bending and impact loading". *International Journal of Impact Engineering*, 43, 6-15.
46. Gilioli, A., Sbarufatti, C., Manes, A., Giglio, M. 2014. "Compression after impact test (CAI) on NOMEXTM honeycomb sandwich panels with thin aluminum skins". *Composites Part B: Engineering*, 67, 313-325.
47. Gordon, S., Boukhili, R., Merah, N. 2014. "Impact behavior and finite element prediction of the compression after impact strength of foam/vinylester-glass composite sandwiches". *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 16(5), 551-574.
48. Ivañez, I., Moure, M. M., Garcia-Castillo, S. K., Sanchez-Saez, S. 2015. "The oblique impact response of composite sandwich plates". *Composite Structures*, 133, 1127-1136.
49. McQuigg, T. D., Kapania, R. K., Scotti, S. J., Walker, S. P. 2014. "Compression After Impact Experiments on Thin Face Sheet Honeycomb Core Sandwich Panels". *Journal of Spacecraft and Rockets*, 51(1), 253-266.
50. Sawal, N., Hazizan, M. A. 2011. "Effect of Core Thicknesses on Impact Performance of Thermoplastic Honeycomb Core Sandwich Structure under Low-Velocity Impact Loading". *Key Engineering Materials*, 471-472, 461-465.
51. Tan, C. Y., Akil, H. Md. 2012. "Impact response of fiber metal laminate sandwich composite structure with polypropylene honeycomb core". *Composites Part B: Engineering*, 43(3), 1433-1438.
52. Zinno, A., Prota, A., Di Maio, E., Bakis, C. E. 2011. "Experimental characterization of phenolic-impregnated honeycomb sandwich structures for transportation vehicles". *Composite Structures*, 93(11), 2910-2924.
53. Akermo, M., Astrom, B. T. 1999. "Experimental Investigation of Compression Molding of Glass/PP-PP Foam Core Sandwich Components". *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 12(4), 297-316.
54. Breuer, U., Ostgathe, M., Neitzel, M. 1998. "Manufacturing of all-thermoplastic sandwich systems by a one-step forming technique". *Polymer Composites*, 19(3), 275-279.
55. Cabrera, N. O., Alcock, B., Peijs, T. 2008. "Design and manufacture of all-PP sandwich panels based on co-extruded polypropylene tapes". *Composites Part B: Engineering*, 39(7-8), 1183-1195.
56. OFFRINGA, A., DAVIES, C. R. 1996. "Gulfstream V floors: primary aircraft structure in advanced thermoplastics". *Journal of advanced materials*, 27(2), 2-10.
57. Pappadà, S., Rametta, R., Passaro, A., Lanzilotto, L., Maffezzoli, A. 2010. "Processing, mechanical properties, and interfacial bonding of a thermoplastic core-foam/composite-skin sandwich panel". *Advances in Polymer Technology*, 29(3), 137-145.
58. Passaro, A., Corvaglia, P., Manni, O., Barone, L., Maffezzoli, A. 2004. "Processing-properties relationship of sandwich panels with polypropylene-core and polypropylene-matrix composite skins". *Polymer Composites*, 25(3), 307-318.

59. Rozant, O., Bourban, P.-E., Manson, J.-A. E. 2001. "Manufacturing of three dimensional sandwich parts by direct thermoforming". *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 32(11), 1593-1601.
60. Skawinski, O., Binetruy, C., Krawczak, P., Grando, J., Bonneau, E. 2004. "All-Thermoplastic Composite Sandwich Panels – Part I: Manufacturing and Improvement of Surface Quality". *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 6(5), 399-421.

