

Kemerli Yapıyla Güçlendirilmiş Sandviç Plakaların Eğme Davranışlarının İncelenmesi

Serdar KAVELOĞLU^{1*}

¹ Makine Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Mimarlık ve Tasarım Fakültesi, Kahramanmaraş İstiklal Üniversitesi,
Kahramanmaraş, Türkiye

*¹ serdar.kaveloglu@istiklal.edu.tr

(Geliş/Received: 31/05/2025;

Kabul/Accepted: 17/07/2025)

Öz: Sandviç kompozit yapılar otomotiv, uçak, tren, yatçılık, inşaat ve güneş panelleri gibi birçok endüstriyel alanlarda kullanılmaktadır. Geçmişten günümüze kadar taş, ağaç, metal ve beton gibi malzemelerden farklı amaçlarla yapı, taşıt ya da demir yolu olarak kullanılan köprülerde yük taşıma kapasitesini artırmak amacıyla kemerli (iki ucu açık yay geometrisinde) yapılar kullanılmıştır. Bu çalışmanın amacı, kemerli yapıların üstün yük taşıma özelliğini sandviç kompozit plakalara uygulamak ve bu sayede yapının eğilme altındaki dayanımını artırmaktır. 3 boyutlu yazıcı ile üretilen ve birbirini tamamlayan kemer geometrisine sahip iki parça arasına, kemer işlevi görecektir şekilde karbon fiber takviyeli polimer (CFRP) kompozitler yerleştirilerek oluşturulan sandviç kompozit yapıların eğme dayanımları incelenmiştir. Sandviç kompozitlerin iç kısımları üç boyutlu yazıcıda akrilonitril bütadien stiren (ABS) filamentten bir yüzü düz, diğer yüzü farklı genişliklerde kemer geometrisinde üretilmiştir. Sandviç yapılarda alt ve üst yüzeyler CFRP kompozit plakalar kullanılmıştır. Çalışmada 50 mm, 100 mm, 150 mm kemer genişliğinde 0,5 mm ve 1 mm kemer kalınlığındaki kemerlerle güçlendirilmiş sandviç yapıların eğme dayanımları incelenmiştir. Sonuç olarak, kemerli yapılar sandviç plakaların eğme dayanımlarını artırdığı tespit edilmiştir. 150 mm kemer genişliğindeki 0,5 mm ve 1 mm kemer kalınlığına sahip numunelerde kemersiz yapılara göre maksimum eğme kuvvetinde sırasıyla %34 ve %67 oranında önemli bir artış elde edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Sandviç kompozit, kemerli yapı, ABS, 3 boyutlu yazıcı, CFRP, eğme dayanımı.

Investigation of Bending Behavior of Sandwich Plates Reinforced with Arched Structure

Abstract: Sandwich composite structures are used in many industrial fields, including automotive, aircraft, train, yachting, construction, and solar panels. Historically, arched structures (with an open-ended arch geometry) have been used to increase load-carrying capacity in bridges constructed from materials such as stone, wood, metal, and concrete, used for various purposes such as pedestrian, vehicle, or railway bridges. The aim of this study is to apply the superior load-carrying properties of arched structures to sandwich composite plates, thereby increasing the structure's resistance under bending. The bending strength of sandwich composite structures, created by placing carbon fiber-reinforced polymer (CFRP) composites between two complementary arch-shaped parts produced with a 3D printer, was investigated. The interiors of the sandwich composites were fabricated using a 3D printer using acrylonitrile butadiene styrene (ABS) filament, with one side flat and the other side in an arch geometry of varying widths. CFRP composite plates were used for the upper and lower surfaces of the sandwich structures. The study investigated the flexural strength of sandwich structures reinforced with arches of 0.5 mm and 1 mm thicknesses, with arch widths of 50 mm, 100 mm, and 150 mm. The results showed that the arched structures increased the flexural strength of the sandwich plates. A significant increase of 34% and 67% in maximum bending force was obtained in samples with 0.5 mm and 1 mm arch thickness and 150 mm arch width, respectively, compared to structures without arches.

Key words: Sandwich composite, arched structure, ABS, 3D printer, CFRP, flexural strength.

1. Giriş

Gelişen mühendislik ihtiyaçları doğrultusunda, hafiflik, yüksek dayanım ve enerji soğurma kabiliyeti gibi özelliklere sahip yeni malzemelere otomotiv, havacılık ve denizcilik endüstrileri de dâhil olmak üzere teknik sektörlerde talep artmaya devam etmektedir [1]. Teknik uygulamalarda kullanılan en yaygın yapısal kompozitler arasında sandviç kompozit paneller, lamine kompozitler ve tekstil yapısal kompozitler bulunur [2]. Sandviç yapılar, iki rijit yüzey tabakasının arasında yer alan hafif ve düşük yoğunluklu bir çekirdekten oluşarak, hem eğilme hem de burulma dayanımı açısından verimli bir yapı sunar [3, 4]. Bu yapılar aynı zamanda darbe dayanımı, termal ve akustik yalıtkan gibi avantajlar da sağlar [5]. Özellikle enerji tasarrufu ve yapısal optimizasyonun ön planda olduğu sektörlerde, sandviç panellerin sunduğu performans mühendisler açısından kritik öneme sahiptir [6].

* Sorumlu yazar: serdar.kaveloglu@istiklal.edu.tr Yazarın ORCID Numarası: 10000-0003-0157-7314

Son yıllarda üretim teknolojilerindeki gelişmeler, sandviç kompozitlerin üretiminde de devrim yaratmıştır. Bu bağlamda eklemeli imalat, geleneksel üretim yöntemlerine alternatif olarak öne çıkmaktadır [7]. Katmanlı üretim olarak da bilinen bu yöntem, karmaşık geometrilere sahip yapıların daha az malzeme israfı ile daha hızlı ve özelleştirilebilir biçimde üretilmesini mümkün kılmaktadır [8]. Eklemeli imalat, sadece üretim esnekliği sunmakla kalmayıp aynı zamanda yeni malzeme kombinasyonları ve fonksiyonel yapılarla mühendislik tasarımlarında önemli yeniliklerin önünü açmaktadır [9-10]. 3D yazıcıda üretilen malzemeler ve yazıcı parametreleri ile ilgili araştırmalara devam edilmektedir. Gyroid kafes yapıdaki PLA (Polylactic Acid), ABS ve PETG (Polyethylene Terephthalate Glycol) polimer tabanlı malzemelerde en yüksek çekme dayanımı PLA malzeme elde edilmiştir [11]. 3D yazıcıda üretilmiş raf destek profilleri, topoloji optimizasyonu ile aynı taşıma kapasitesinde %70 malzeme tasarruf edilmiştir [12]. Cam elyaf takviyeli polyamide 6 kompozit çekme yükü altında ABS'ye göre %59 daha iyi performans elde edilmiştir [13].

Yapısal sistemlerin tasarımında yalnızca malzeme seçimi değil, form ve geometri de büyük rol oynamaktadır [14]. Bu kapsamda kemerli yapılar, hem tarihî hem de modern inşaat mühendisliği uygulamalarında yaygın şekilde kullanılmaktadır [15, 16]. Kemerli formlar, üzerlerine gelen yükleri yanlara ileterek taşıyıcı ayaklara aktarma prensibiyle çalıştıkları için, basınca dayanıklı malzemelerle yüksek taşıma kapasitesi sunarlar. Roma döneminden bu yana kullanılan kemerli köprüler ve tünel açıklıkları, bu yapıların dayanım ve estetik açısından ne denli etkili olduğunu göstermektedir [17]. Modern mühendislikte ise, kemerli yapıların dinamik yükler altında gösterdiği performans da önemli bir araştırma konusu hâline gelmiştir [18]. Metal ve taş malzemedeki kemerli yapıların dayanımlarının deneysel ve analitik çalışmaları yapılmıştır [19, 20].

Sandviç yapılarda son yıllarda tek katlı yerine iki veya çok katlı sandviç plakalarla ilgili çalışmalarda hız kazanmıştır. Sandviç yapılarda çok katmanlı çekirdek kullanımı, olası bir kırılmanın yapı içinde kademeli olarak iletilmesini ve böylece kırılmanın geciktirilmesini sağlar. Bu nedenle, havacılık ve uzay mühendisliğinde kullanılmaktadır [21]. Tek ve çok katmanlı sandviç yapıların eğilme [22] ve basma testlerinde [23], çok katmanlı yapıların mekanik özelliklerinin üstün olduğu gözlemlenmiştir.

Çekirdek kısımları üç boyutlu yazıcıda üçgen, kare, trapez, sinüzoidal ve yay gibi farklı geometrilerde üretilen oluklu sandviç kompozit yapıların mekanik özellikleri araştırılmıştır [24-25]. Üçgen ve dikdörtgen oluklu sandviç panellerle yapılan araştırmada üçgen oluklu sandviç panellerin eğme dayanımının daha yüksek olduğu tespit edilmiştir [26]. Yay şeklinde farklı doluluk oranlarındaki oluklu sandviç kompozitlerin yay genişliği ile doluluk oranının mekanik özellikleri üzerine etkili olduğu gözlemlenmiştir [27].

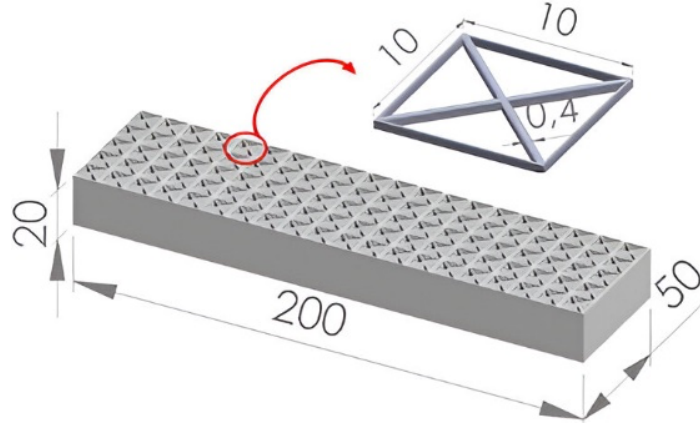
Yukarıda sunulan araştırmalar incelendiğinde, sandviç yapılarla ilgili çalışmaların çoğunda çekirdek kısmı farklı malzemelerle ya da farklı geometrilerle sahip sandviç plakaların mekanik özellikleri araştırılmıştır. Bu çalışmanın literatüre katkısı, ilk defa kemerli yapılar kompozit sandviç plakalara model olarak uygulanmıştır. Böylelikle kemersiz sandviç yapıların kemerle güçlendirilmiş sandviç yapılara göre eğme dayanımlarının ne ölçüde etkilendiği araştırılmıştır. Bu çalışmada üç boyutlu yazıcıda bir yüzü düz, diğer yüzü kemer formunda üretilen ve birbirini tamamlayan iki parça çekirdek arasına, farklı genişlik ve kalınlıktaki CFRP kompozit yerleştirilerek üretilen sandviç kompozitlere 3 nokta eğme testleri uygulanmış, sonuçlar karşılaştırılarak yorumlanmıştır.

2. Materyal ve Yöntem

2.1. Sandviç kompozitlerin üretimi

Sandviç yapıların boyutları ASTM 393-16 [28] standardına göre boyu 200 mm, eni 50 mm olarak belirlenmiştir. Çekirdek kısmı SOLIDWORKS® 2024 3D Tasarım (CAD) yazılımı kullanılarak tasarlanmıştır. Bu çalışmada Quadri-Grid geometrisi, 3D baskı ile üretilmiş polimer kompozitlerin mekanik performansını artırmak amacıyla tercih edilmiştir. Quadri-Grid geometrisi, düzenli dörtgen hücrelerin tekrar eden diziliminden oluşan yük taşıma ve deformasyon kontrolü açısından avantaj sağlamaktadır [29]. Numunelerin hem hafif hem de kuvvet dağılımının çok iyi [30] olması amacıyla Şekil 1'de görülen kenar uzunlukları 10 mm, duvar kalınlığı 0,4 mm olan Quadri-Grid geometrisi kullanılmıştır.

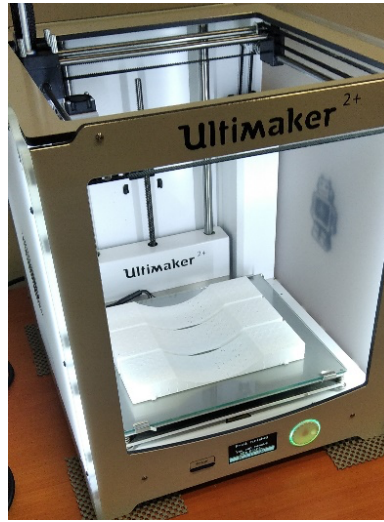
3 boyutlu yazıcıda üretimin yapılabilmesi için Solidworks programında “.stl” uzantılı olarak kaydedilen dosyalar Tablo 1'de gösterilen parametrelerde G-kodu üretilmiştir. Bu parametreler, önceki çalışmalar [31] ve Ultimaker firmasının önerileri dikkate alınarak belirlenmiştir. Ultimaker Cura 5.7.2 [32] CAM yazılımı kullanılarak G-kodları üretilmiştir. Bu kodlarla Şekil 2'de görülen tabla ısıtmalı Ultimaker 2+ [33] marka 3 boyutlu yazıcıda beyaz renkli ABS filamentten çekirdekler üretilmiştir. ABS filament, Ultimaker 2+ yazıcıda kullanımı uygun olduğu için tercih edilmiştir.



Şekil 1. Quadri-Grid geometrisindeki eğme numunesinin ölçülerinin gösterimi.

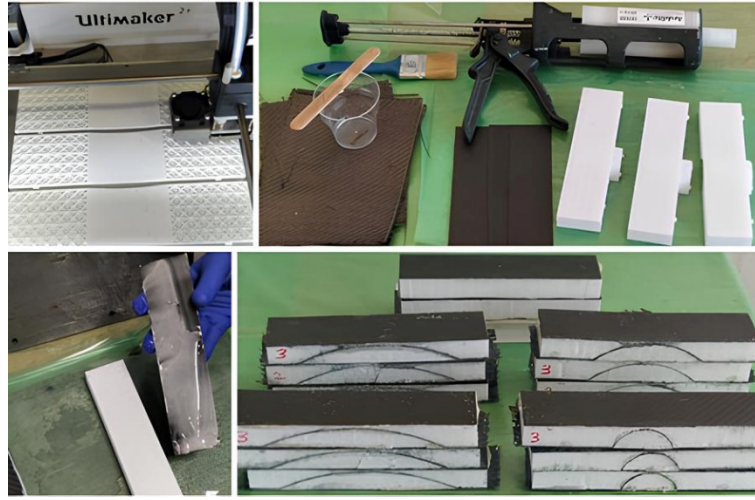
Tablo 1. Ultimaker Cura 5.7.2 CAM yazılımında seçilen parametreler.

Yazıcı:	Ultimaker 2+
Malzeme:	ABS (Ultimaker)
Filament çapı:	2,85 mm
Katman kalınlığı:	0,2 mm
Duvar kalınlığı:	0,4 mm
Üst / Alt kalınlık:	0,4 mm
Yazdırma hızı:	60 mm/s
Boşta gezme hızı:	120 mm/s
Nozul çapı:	0,4 mm
Nozul sıcaklığı:	250 °C
Tabla sıcaklığı:	80 °C
Dolgu deseni:	Lines
Dolgu yoğunluğu:	%100



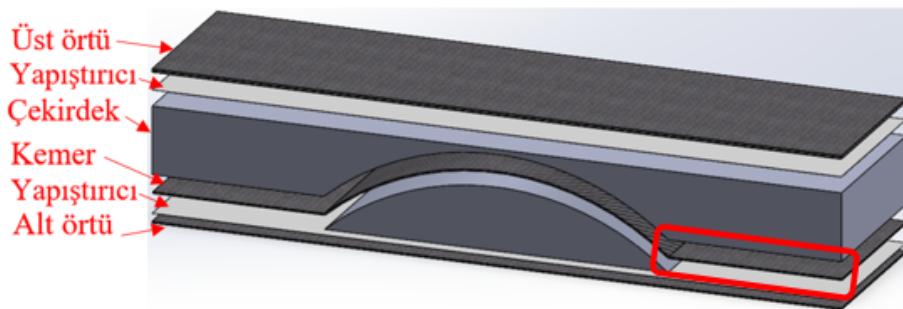
Şekil 2. Numunelerin üretiminde kullanılan Ultimaker 2+ marka üç boyutlu yazıcı.

Eğme numunelerinin üretim aşamaları Şekil 3'te gösterilmiştir. CFRP kompozit plakalar, karbon elyaf kumaş, yapıştırıcı ve epoksi reçine sistemi Dost kimya firmasından tedarik edilmiştir. Sandviç kompozit numunelerin örtü tabakalarında, hacimce %50 karbon fiber kumaş içeren 0,5 mm ve 1 mm kalınlığındaki CFRP plakalar kullanılmıştır. CFRP plakalar, karbon fiber epoksi prepreg yüksek sıcaklık ve basınç altında preslenerek üretilmiştir. Alt ve üst örtülere iki bileşenli epoksi esası Araldite® 2015 yapıştırıcı [34] sürülerek çekirdek ile birleştirilmiştir. Numunelerde kemerler 3 boyutlu yazıcıda üretilen iki parça çekirdek arasına twill tipi (200 gr/m²) dokuma karbon fiber kumaş serilerek üzerine fırça yardımıyla epoksi reçine sürülmüştür. Epoksi reçinenin karışımında kütlece %80 LR160 reçine %20 LH160 sertleştirici kullanılmıştır. Sandviç kompozit yapılar, çelik levhalar arasına yerleştirilen numunelerin 0,5 MPa basınç altında, ağırlık kullanılarak 24 saat süreyle kürlenmesiyle elde edilmiştir. Numunelerde alt örtü 0,5 mm, üst örtü 1 mm kalınlığındaki CFRP kompozit plakalar kullanılmıştır.

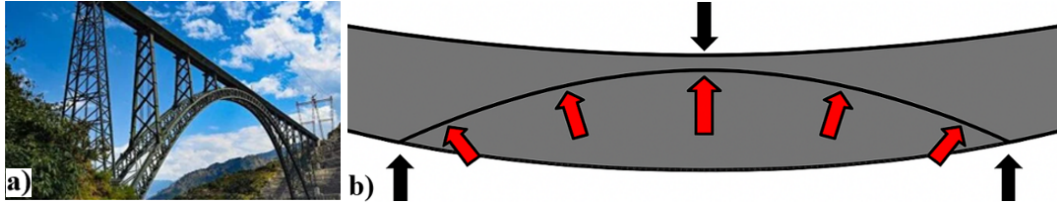


Şekil 3. Sandviç kompozit numunelerin üretim aşamalarının görüntüsü.

Üretilen sandviç kompozit numunelerin katmanlarıyla birlikte şematik olarak Şekil 4'te gösterilmiştir. Kemerli yapılar özellikle inşaat alanında kemerlerin iki ucu zemine sabitlenir, böylelikle kemerli yapı zeminden destek olarak güçlenmiş olur. Fakat sandviç yapıda bu mümkün olmadığı için bu problemi aşmak için Şekil 4'te kırmızı dikdörtgen bölgede gösterildiği gibi karbon fiber kumaş uzatılmıştır. Bu şekilde kumaş, çekirdek ve alt örtü arasında kaldığı için yapıdan daha iyi mekanik performans elde edilmiştir.



Şekil 4. Kemerle güçlendirilmiş sandviç kompozit yapının katmanlarının şematik gösterimi.



Şekil 5. Kemerli yapılara ait görüntüler a) Metal demiryolu köprüsü, Keşmir, Hindistan b) Kemerle güçlendirilmiş sandviç yapının üç nokta eğme testi yük altındaki şematik görüntüsü.

Tablo 2. Numune tiplerine göre şekil ve sandviç ölçüleri.

Numune tipi	Şekli	Kemer genişliği (mm)	Kemer kalınlığı (mm)	Sandviç Boyu (mm)	Sandviç Genişliği (mm)	Sandviç yüksekliği (mm)
Kemersiz		–	–	200	50	21,5
50K_05		50	0,5	200	50	22
100K_05		100	0,5	200	50	22
150K_05		150	0,5	200	50	22
150K_1		150	1	200	50	22,5

Çalışmada, kemersiz ve üç farklı (50 mm, 100 mm, 150 mm) kemer genişliğine sahip numunelerle birlikte 0,5 mm ve 1 mm iki farklı kalınlıkta kemer kullanılarak beş farklı parametrede sandviç kompozit üretilmiştir. ASTM 393-16 standardına göre üç nokta eğme testinde sabit alt iki destek mesafesi 150 mm’dir. Bu yüzden çalışmada kemer genişliklerini 50 mm’den 150 mm’ye kadar eşit aralıklarda artırarak 50 mm, 100 mm ve 150 mm üç farklı kemer genişliği ölçüsü tercih edilmiştir. Böylelikle farklı kemer genişliklerinin sandviç plakaların eğme dayanımlarına etkisi incelenmiştir. Kemer kalınlığının eğme dayanımı üzerindeki etkisini incelemek amacıyla, sandviç plakanın toplam kütlesini önemli ölçüde artırmadan karşılaştırma yapılabilmesi için 0,5 mm (2 kat kumaş)

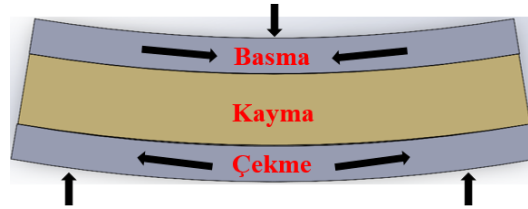
ve 1 mm (4 kat kumaş) kalınlığında kemerlere sahip numuneler üretilmiştir. Her parametre için 3'er adet numuneler üretilmiştir.

Şekil 5 a'da kemerli yapıya sahip demiryolu köprüsü görülmektedir. Kemerli yapı sayesinde köprünün taşıma kapasitesi artırılmıştır. Buradan hareketle bu çalışmada sandviç plakalar kemerle güçlendirilmiştir. Kemerle güçlendirilmiş sandviç kompozit yapının üç nokta eğme deneyi sırasında mekanik davranışı Şekil 5 b'de şematik olarak gösterilmiştir. Şekilde içten dışa doğru kırmızı renkli oklarla gösterilen ön gerilmelere sahip kemerden faydalanılarak sandviç kompozit plakaların eğme dayanımlarına etkisi araştırılmıştır.

Üretilen numunelerin şekil ve özellikleri Tablo 2'de verilmiştir. Üretilen numune tipleri, kullanılan kemer genişliği ile kemer kalınlığına göre adlandırılmıştır. Örneğin kemer genişliği 150 mm ve kemer kalınlığı 0,5 mm olan numuneler 150K_05 olarak adlandırıldı.

2.2. Üç nokta eğme deneyleri ve sonuçları

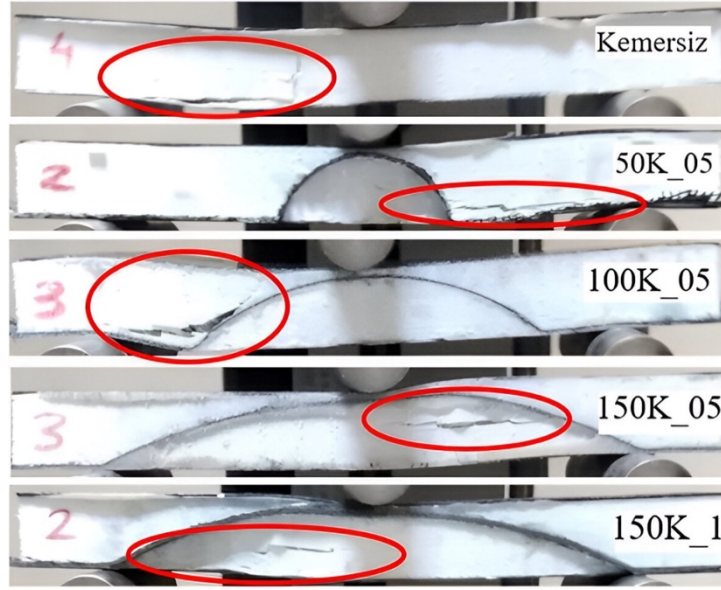
Üç nokta eğme testleri Zwick/Roell marka 100 kN kapasiteli Z100 tip test cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. ASTM C393-16 standart test yöntemine göre test hızı 6 mm/dk, iki destek arası mesafe 150 mm olarak seçilmiştir. Üç nokta eğme testleri belirlenmiş standarda göre hareketsiz iki destek noktası üzerine bırakılan malzemenin üst orta noktasından kuvvet uygulanmasıyla gerçekleştirilir. Sandviç yapılarda, üç nokta eğme testinde Şekil 6'da görüldüğü üzere yapının üç farklı bölgesi farklı kuvvetlere maruz kalırlar. Kuvvetin uygulandığı yapının üst kısmı basma kuvvetine, orta kısmı kayma kuvvetine ve alt destek noktalarına yakın kısım ise çekme kuvvetine maruz kalırlar [2].



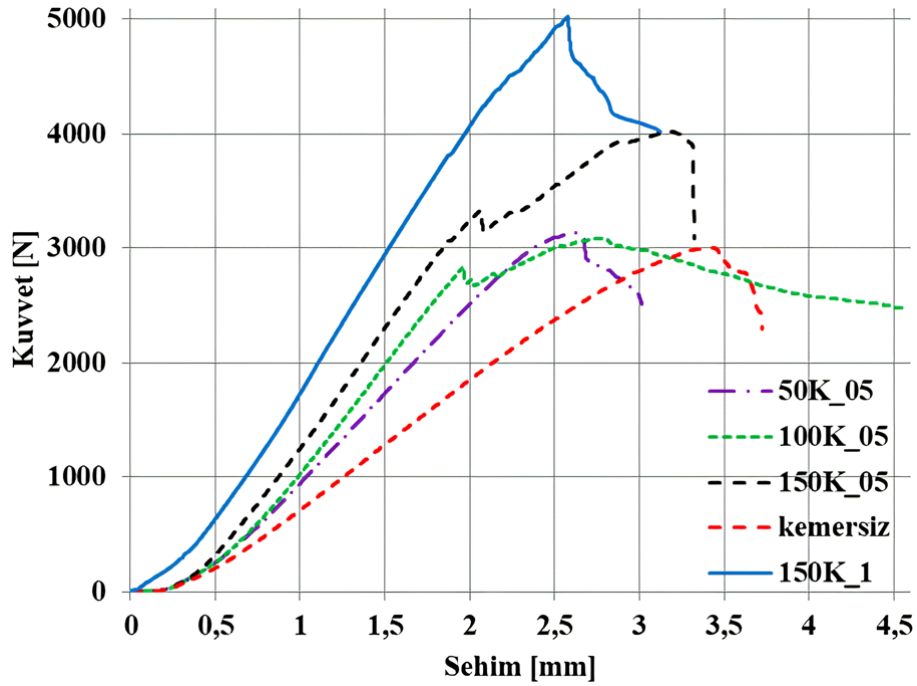
Şekil 6. Sandviç yapının üç nokta eğme testi yük altındaki mekanizması.

Şekil 7'de testin bitiminde cihaz üzerinde numunelerin görüntüleri gösterilmektedir. Kırmızı elips içine alınan kısımlar kompozit sandviç yapıların uğradığı hasar tipleri hakkında bilgi vermektedir. Numunelerin yüzeylerinde kırılma, delaminasyon veya yapıştırma kaynaklı herhangi bir sorun meydana gelmemiştir. Yapıştırıcı ve birleştirme yönteminin ABS çekirdek ile CFRP kompozit yüzeyler için uygun olduğu belirlenmiştir. Hasarlar genellikle CFRP kompozit örtülere göre daha kırılkan olan ABS çekirdekte kırılma şeklinde oluşmuştur. Kemersiz kompozit sandviçlerde, kuvvet orta noktadan tatbik edildiğinden üst mile yakın kısımdan dikey kırılarak yatay yönde sabit alt destek miline kadar delaminasyon devam ettiği tespit edilmiştir. 50 mm ve 100 mm kemerle güçlendirilmiş kompozit sandviçlerde hasar kemerlerin dışında kırılma tespit edildiğinden dolayı kemerlerin yapıyı eğmeye karşı iyileştirdiği görülmektedir. Kemer genişlikleri alt iki destek mesafesinden küçük olduğundan kırılma kemer ile alt destek mili arasındaki bölgede kırılma meydana gelmiştir. 150 mm kemer genişliğindeki sandviç kompozitlerde kemer genişliği alt destek milleri arası mesafeye eşit olduğundan kemer uçlarından desteklenmiştir. Bu durum yapıyı daha da güçlendirmiştir, kemer içerisinde yatay olarak kırılma gözlemlenmiştir.

Numunelere yapılan testlerden kuvvet-sehim grafikleri elde edilmiştir. Kemersiz, kemer kalınlığı 0,5 mm ve 1 mm olan farklı kemer genişliğine sahip numunelerin kuvvet-sehim grafiği Şekil 8'de görülmektedir. Beklenildiği üzere maksimum eğme kuvvetinin kemerli numunelerde kemersiz numunelere göre daha yüksek olduğu grafikte görülmektedir [35-36]. Grafikte kemerli sandviç kompozit numunelerin eğimi kemersiz numunelerin eğiminden fazla olduğu yani kemerle güçlendirmek yapıyı daha rijit hale getirdiği görülmektedir. Maksimum eğme kuvveti 150 mm kemer genişliğine sahip numunelerde elde edilmiştir. Yapılan testlerde 150 mm kemer genişliğine sahip 1 mm kemer kalınlığındaki numunelerin eğme kuvvetinin, 0,5 mm kemer kalınlığındaki numunelerin eğme kuvvetine göre daha yüksek çıktığı kuvvet-sehim grafiğinde görülmektedir.



Şekil 7. Numunelerin eğme testlerindeki hasar görüntüleri.



Şekil 8. Farklı kemer genişliği ve kalınlığındaki numunelerin kuvvet-sehim grafiği.

Sandviç kompozitlerin üretiminde çekirdekler, alt ve üst örtüler, karbon fiber kumaşlar, reçine ve yapıştırıcı miktarları üretim sırasına göre sırayla kütleleri ölçüldü. Tasarım programından elde ettiğimiz hacim değerleri kullanılarak sandviç kompozitlerin yoğunlukları hesaplanmıştır. Elde edilen bu değerler Tablo 3'te numune tiplerine göre gösterilmektedir. Tabloya göre kemerli numunelerin kemer genişliği arttıkça yoğunlukları da artmıştır. 150K_1 adlı numunenin yoğunluğu, 150K_05 adlı numunenin yoğunluğundan %11,4 daha yüksek olmasına rağmen maksimum eğme kuvvetindeki artış %33,3 olarak gerçekleşmiştir. Bu durum kemer genişliği ile

birlikte kemer kalınlığının da anlamlı olduğunu göstermiştir. Birim yoğunluktaki maksimum eğme kuvveti 150K_1 tipindeki numunelerde elde edilmiştir.

Tablo 3. Numune tiplerine göre yoğunluk ve eğme kuvvet değerleri tablosu.

Numune tipi	Sandviç kompozitin yoğunluğu (gr/cm ³)	Yoğunluktaki artış (%)	Maksimum eğme kuvveti (N)	Maksimum eğme kuvvetindeki artış oranı (%)	Maksimum eğme kuvveti / yoğunluk (N/(gr/cm ³))
Kemersiz	1,359	-	3000	-	2207,5
50K_05	1,433	5,4	3160	5,3	2205,2
100K_05	1,485	9,3	3090	3,0	2080,8
150K_05	1,513	11,3	4030	34,3	2663,6
150K_1	1,667	22,7	5030	67,6	3017,4

3. Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışmada, 3 boyutlu yazıcıda ABS filamentli ile CFRP kompozit kullanılarak sandviç kompozit plakalar elde edilmiştir. Üç farklı kemer genişliği ile kemer kalınlığının sandviç kompozit plakanın eğme dayanımına etkisi deneysel olarak incelenmiş ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- Kemersiz yapı, tüm numuneler arasında en düşük eğme dayanımını göstermiştir. Ancak sehim davranışı değerlendirildiğinde, diğer numunelere kıyasla daha sünük bir deformasyon sergilediği belirlenmiştir.
- Kemerli yapılarla desteklenen sandviç kompozitlerin, kemersiz sandviç kompozitlere göre eğme dayanımları ve rijitlikleri artmıştır.
- Kemerli sandviç kompozit yapılarda, kemer genişliğinin alt destek noktalarına doğru artmasıyla birlikte eğme dayanımında da artış gözlemlenmiştir.
- Kemer genişliğinin 150 mm alt destek mesafesine eşit ve kemer kalınlığının 1 mm olmasından dolayı maksimum eğme kuvveti 150K_1 numunelerde elde edilmiştir.
- 150K_05 ve 150K_1 tipindeki numunelerde sırasıyla kemersiz yapılara göre maksimum eğme kuvvetinde %34 ve %67 oranında artış elde edilmiştir. Ancak kırılma sonrası kuvvette ani bir düşüş tespit edilmiş, bu durum yapıların gevrek bir deformasyon davranışı gösterdiği tespit edilmiştir.
- Kemerle güçlendirilen sandviç kompozit yapılarda kemer kalınlığının artması eğme dayanımını artırmıştır.
- Birçok yapı elemanının güçlendirilmesinde kullanılan kemerli yapılar, sandviç kompozitlerde de eğme dayanımını artırdığı tespit edilmiştir.
- Gelecekte yapılacak çalışmalar kapsamında, kemer yerleşim konumunun (alt, orta ve üst yüzeylerde) yapısal performansa etkisi detaylı olarak araştırılabilir. Ayrıca, farklı çekirdek malzemelerinin kullanımıyla yapıların enerji sönümleme kapasitesi ve darbe dayanımı değerlendirilebilir. Otomotiv ve havacılık gibi endüstriyel alanlarda kullanım potansiyelini belirlemek için uygulamaya yönelik mekanik testlerin gerçekleştirilmesi önerilmektedir.

Teşekkür

Bu çalışma, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi (KSÜ BAP) tarafından 2024/8-23 M nolu proje ile desteklenmiştir. Desteklerinden dolayı KSÜ BAP birimine teşekkür ederim.

Kaynaklar

- [1] Li T, Zhu M, Yang Z, Song J, Dai J, Yao Y, Hu L. Wood composite as an energy efficient building material: guided sunlight transmittance and effective thermal insulation. *Adv Energy Mater* 2016; 6(22): 1601122.
- [2] Singh P, Sheikh J, Behera B. K. Metal-faced sandwich composite panels: a review. *Thin-Walled Struct* 2024; 195: 111376.
- [3] Geren N, Uzay Ç, Boztepe MH, Bayramoğlu M. Sandviç Malzeme Geliştirmede Polimer Köpük Çekirdek Kalınlığının Eğilme Dayanımına Etkisinin Deneysel olarak Araştırılması. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi* 2017; 32(2): 13-22.
- [4] Kaveloğlu S, Temiz Ş, Doğan O, Kamer MS. 3 Boyutlu Yazıcı ile Üretilen Farklı Hücre Çaplarındaki Bal Peteği Sandviç Yapıların Eğme Dayanımlarının İncelenmesi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi* 2022; 37(2): 459-470.
- [5] Davies JM. (Ed.). *Lightweight sandwich construction*. UK: John Wiley & Sons, 2008.
- [6] Ferri R, Sankar BV. A comparative study on the impact resistance of composite laminates and sandwich panels. *J Thermoplast Compos Mater* 1997; 10(4): 304-315.
- [7] Murdy P, Dolson J, Miller D, Hughes S, Beach R. Leveraging the advantages of additive manufacturing to produce advanced hybrid composite structures for marine energy systems. *Appl Sci* 2021; 11(3): 1336.
- [8] Camacho DD, Clayton P, O'Brien WJ, Seepersad C, Juenger M, Ferron R, Salamone S. Applications of additive manufacturing in the construction industry—A forward-looking review. *Autom Constr* 2018; 89: 110-119.
- [9] Singh N. Additive manufacturing for functionalized nanomaterials breaks limits. In *Additive Manufacturing with Functionalized Nanomaterials* 2021; (pp. 1-34). Elsevier.
- [10] Yanen C, Çelik E, Solmaz MY. Çekirdek Malzemesi Ergiyik Biriktirme Yöntemi İle Üretilen Bal Peteği Sandviç Kompozitlerin Eğilme Dayanımlarının İncelenmesi. *Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi* 2021; 10(2): 147-162.
- [11] Güdür C, Türkoğlu T, Eren İ. Effect of lattice design and process parameters on the properties of PLA, ABS AND PETG polymers produced by fused deposition modelling. *J Mater Mechat A* 2023; 4(2): 561-570.
- [12] Fenni BÖ, Eken E, Kaygısız H. Application of topology optimization on a 3D-printed shelf bracket. *Int J Print Technol Digit Ind* 2024; 8(1): 32-45.
- [13] Tanabi H. Investigation of the temperature effect on the mechanical properties of 3D printed composites. *Int Adv Res Eng J* 2021; 5(2): 188-193.
- [14] Pottmann H, Eigensatz M, Vaxman A, & Wallner J. Architectural geometry. *Comput Graph* 2015; 47: 145-164.
- [15] Valluzzi MR, Modena C, de Felice G. Current practice and open issues in strengthening historical buildings with composites. *Mater Struct* 2014; 47: 1971-1985.
- [16] Conde B, Ramos LF, Oliveira DV, Riveiro B, Solla M. Structural assessment of masonry arch bridges by combination of non-destructive testing techniques and three-dimensional numerical modelling: Application to Vilanova bridge. *Eng Struct* 2017; 148: 621-638.
- [17] Almssad A, Almusaed A, Homod RZ. Masonry in the context of sustainable buildings: A review of the brick role in architecture. *Sustainability* 2022; 14(22): 14734.
- [18] Hurdoganoglu D, Safaei B, Sahmani S, Onyibo EC, Qin Z. State-of-the-art review of computational static and dynamic behaviors of small-scaled functionally graded multilayer shallow arch structures from design to analysis. *Arch Comput Methods Eng* 2024; 31(1): 389-453.
- [19] Emami E, Kheyroddin A, Rezaifar O. Experimental and analytical investigation of arched steel haunches under cyclic loading. *Eng Struct* 2021; 246: 113041.
- [20] Rafiee A, Vinches M, Bohatier C. Application of the NSCD method to analyse the dynamic behaviour of stone arched structures. *Int J Solids Struct* 2008; 45(25-26): 6269-6283.
- [21] Gorgeri A, Vescovini R, Dozio L. Analysis of multiple-core sandwich cylindrical shells using a sublaminar formulation. *Compos Struct* 2019; 225: 111067.
- [22] Arbaoui J, Moustabchir H, Pruncu CI, Schmitt Y. Modeling and experimental analysis of polypropylene honeycomb multi-layer sandwich composites under four-point bending. *J Sandw Struct Mater* 2018; 20(4): 493-511.
- [23] Naresh K, Cantwell WJ, Khan KA, Umer R. Single and multi-layer core designs for Pseudo-Ductile failure in honeycomb sandwich structures. *Compos Struct* 2021; 256: 113059.
- [24] Dang W, Liu XT, Sun BH. Bending response of integrated multilayer corrugated sandwich panels. *Appl Compos Mater* 2023; 30(5): 1493-1512.
- [25] Xia F, Pang T, Sun G, Ruan D. Longitudinal bending of corrugated sandwich panels with cores of various shapes. *Thin-Walled Struct* 2022; 173: 109001.
- [26] Abedzade Atar H, Zarrebini M, Hasani H, Rezaeepazhand J. The effect of core geometry on flexural stiffness and transverse shear rigidity of weight-wise identical corrugated core sandwich panels reinforced with 3D flat spacer knitted fabric. *Polym Compos* 2020; 41(9): 3638-3648.
- [27] Shahkarami M, Zeinedini A. Flexural Properties of 3D-printed hierarchical-sinusoidal corrugated core sandwich panels with natural fiber reinforced skins. *Polym Polym Compos* 2022; 30: 09673911221101299.
- [28] ASTM-C393/C393M-16, Standard Test Method For Core Shear Properties of Sandwich Constructions by Beam Flexure, 2016.
- [29] Atahan MG, Erikli M, Ozipek E, Ozgun F. Comparative study on bending behavior and damage analysis of 3D-printed sandwich core designs with bio-inspired reinforcements. *Eng Fail Anal* 2024; 163: 108439.

- [30] Lu C, Qi M, Islam S, Chen P, Gao S, Xu Y, Yang X. Mechanical performance of 3D-printing plastic honeycomb sandwich structure. *Int J Precis Eng Manuf-Green Technol* 2018; 5: 47-54.
- [31] Kaveloglu S, Temiz S. An experimental and finite element analysis of 3D printed honeycomb structures under axial compression. *Polym Polym Compos* 2022, 30: 09673911221122333.
- [32] Ultimaker Cura 5.7.2 software, 2024, <https://github.com/Ultimaker/Cura/releases/tag/5.7.2-RC2> (Erişim 03.05.2025).
- [33] The Ultimaker 2+ specifications, 2020, <https://support.ultimaker.com/hc/en-us/articles/360011915779-The-Ultimaker-2-specifications> (Accessed 03.05.2025).
- [34] Araldite® 2015 Adhesive Technical Datasheet, 2015, <https://docs.rs-online.com/47fc/A700000006492752.pdf> (Accessed 03.05.2025).
- [35] Altemimi JE, Said AI, Al-Mahaidi R. Experimental Investigation of Masonry Arches Strengthened with Carbon Fiber Composites CFRP. In *Geotechnical Engineering and Sustainable Construction: Sustain Geotech Eng 2022*; (pp. 627-639). Singapore: Springer Singapore.
- [36] Rovero L, Focacci F, Stipo G. Structural behavior of arch models strengthened using fiber-reinforced polymer strips of different lengths. *J Compos Constr* 2013; 17(2): 249-258.