



## Three-point bending behaviors of the s-core sandwich panel: Finite element modeling and experimental investigation

Hasan Murat Öztemiz<sup>1\*</sup>, Şemsettin Temiz<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Elbistan Vocational School, Kahramanmaraş İstiklal University, 46300, Kahramanmaraş, Türkiye

<sup>2</sup>Mechanical Engineering Department, Inonu University, 44280, Malatya, Türkiye

### Highlights:

- S-core sandwich panel composite design and manufacturing were done
- Finite element modeling and mechanical tests were performed in three-point bending
- Bending behaviors were compared

### Keywords:

- Bending properties
- Sandwich panel
- Finite element modeling
- Mechanical test

### Article Info:

Research Article

Received: 19.09.2022

Accepted: 20.11.2023

### DOI:

10.17341/gazimmfd.1176877

### Acknowledgement:

### Correspondence:

Author: Hasan Murat Öztemiz

e-mail:

hmoztemiz@gmail.com

phone: +90 541 597 2844

### Graphical/Tabular Abstract

Composite panel sandwiches can meet the needs of modern engineering applications with their core geometry and different material selection. This article investigates the deflection behavior of nine S-core composite panel sandwich configurations against the damage load calculated due to the three-point bending test and finite element analysis, as can be seen in Figure A.

B:0,6-7,5  
Total Deformation  
Type: Total Deformation  
Unit: mm  
Time: 11 s  
25.01.2024 06:10

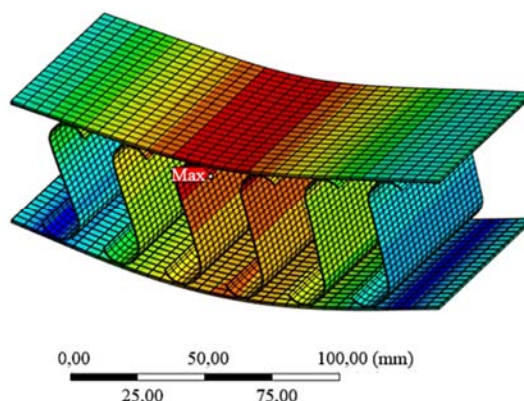
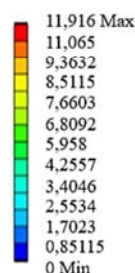


Figure A. S-core sandwich panel composite three-point bending ANSYS mechanical analysis and experimental test specimen

### Purpose:

Core geometry and material selection in sandwich panel composite studies show themselves in the current literature. It is thought that the three-point bending behaviors with different geometric dimensions of the S-core structure will contribute to the literature.

### Theory and Methods:

The measurement taken for the three-point bending test dimensioning and the models created with the ANSYS mechanical finite element analysis program were applied. Physical experiments and numerical analysis data were compared.

### Results:

Experimental studies and finite element analysis results are compatible. It stands out with its lower density than different core structures.

### Conclusion:

When the damage loads are examined, it is seen that the damage loads and bending stiffness increase as the core thicknesses increase, which gradually reduces the deflection of the plates. This is because as the core materials' thickness increases, the resistance against bending causes less bending and deflection as the moment of inertia increases. As the radii of curvature of the S-shaped core material increase, the damage loads decrease. In the expression  $(1/\rho=M/EI)$ , the expression  $(M/EI)$  decreases as the radius of curvature increases; that is, failure deformations and failure stresses are reached with a lower bending moment and lower damage load. As a result of the analysis, the damage occurs on the core, and the regressions on the adhesive do not cause damage. This provides a broader spectrum for adhesive selection.



## S-çekirdekli sandviç panel kompozitin üç nokta eğme davranışları: Sonlu eleman modelleme ve deneysel incelemesi

Hasan Murat Öztemiz<sup>1\*</sup>, Şemsettin Temiz<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Kahramanmaraş İstiklal Üniversitesi, Elbistan Meslek Yüksekokulu, 46300, Kahramanmaraş, Türkiye

<sup>2</sup>İnönü Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 44280, Malatya, Türkiye

### ÖNEÇIKANLAR

- S-çekirdekli sandviç panel kompozit tasarımı ve imalatı yapıldı
- Üç nokta eğmede sonlu eleman modelleme ve mekanik testler yapıldı
- Eğilme davranışlarının karşılaştırılması gerçekleştirildi

### Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 19.09.2022

Kabul: 20.11.2023

DOI:

10.17341/gazimmfd.1176877

### Anahtar Kelimeler:

Eğilme özellikleri,  
sandviç panel,  
sonlu eleman modelleme,  
mekanik test

### ÖZ

Sandviç panel kompozitler, malzeme teknolojisi uygulamalarında geniş bir kullanım alanına sahiptir. Tasarlanan sandviç panel kompozit malzemesi; üst ve alt levha olarak paslanmaz çelik-316, çekirdek malzemesi alüminyum 1050A-0 ve bağlayıcı eleman olarak DP-8405 akrilik yapıştırıcıdan yapılmıştır. S-çekirdekli kompozit sandviç panellerin eğilme davranışları, üç nokta eğilme testleri ve sonlu eleman modelleri ile incelenmiştir. Kompozit elemanların eğilme davranışlarının varyasyonlar üzerindeki etkisini karakterize etmek için sonlu eleman modelleri geliştirilmiştir. Genel olarak, kompozit S-çekirdekli sandviç yapıların spesifik eğilme modülü ve mukavemeti, literatürdeki çekirdek yapıları ile karşılaştırılabilir. Bu doğrultuda, ağırlık ve yoğunluk açısından verimli hibrit kompozit sandviç panellerin elde edilmesi için bir kılavuz sağlamak üzere minimum ağırlık tasarımı kullanılmıştır. Deneysel sonuçlarındaki hasar yükleri incelendiğinde, çekirdek kalınlıkları arttıkça hasar yüklerinin % 6.54 ile %34.81 aralığında artış gösterdiği ilaveten, eğrilik yarıçapı arttıkça hasar yükleri %3.65 ile %31.46 aralığında azalış gösterdiği sonucuna varılmıştır.

## Three-point bending behaviors of the s-core sandwich panel: Finite element modeling and experimental investigation

### HIGHLIGHTS

- S-core sandwich panel composite design and manufacturing were done
- Finite element modeling and mechanical tests were performed in three-point bending
- Bending behaviors were compared

### Article Info

Research Article

Received: 19.09.2022

Accepted: 20.11.2023

DOI:

10.17341/gazimmfd.1176877

### Keywords:

Bending properties,  
sandwich panel,  
finite element modeling,  
mechanical test

### ABSTRACT

Sandwich panel composites have a wide range of uses in material technology applications. The designed sandwich panel composite material; is made of stainless steel-316 as the top and bottom plate, aluminum 1050A-0 as the core material, and DP-8405 acrylic adhesive as the binding element. Three-point bending tests and finite element models investigated the bending behavior of S-core composite sandwich panels. Finite element models have been developed to characterize the effect of the bending behavior of composite elements on variations. The specific flexural modulus and strength of composite S-core sandwich structures can be compared with core structures in the literature. Accordingly, the minimum weight design provided a guideline for obtaining weight and density-efficient hybrid composite sandwich panels. When the damage loads in the test results were examined, it was concluded that the damage loads increased between 6.54% and 34.81% as the core thicknesses increased, and the damage loads decreased between 3.65% and 31.46% as the radius of curvature increased.

## 1. Giriş (Introduction)

Kompozit malzemeler, havacılık, uzay, ulaşım, inşaat, elektronik ve gıda endüstrisi gibi hafiflik, yüksek mukavemet ve şekil koruma, yapısal ve darbe dayanımı [1-4], yüksek eğilme sertliği, mukavemet ve enerji emme kapasitesi gibi mühendislik uygulamalarında kullanılmaktadır. Karmaşık şekiller elde etmek için yüksek aşınma, korozyon direnci ve dinamik darbe olaylarında direnç, düşük yoğunluk ile esneklik gerektiren uygulamalarda geleneksel malzemelere göre tercih edilir [5-7]. Örneğin, zemin panelleri, iç duvarlar, gıda işleme mutfakları ve yolcu depolama rafları gibi uçak iç mekanlarında sandviç kompozitler tercih edilmektedir [8]. Çekirdek yapısındaki malzeme ve geometrik düzenlemenin artırılması, sıkıştırma özellikleri (eğilme ve burkulma direnci), kayma rijitliği, yüksek enerji emme yeteneği [6-9], hafifliği özellikle sandviç kompozit panellerin yaygın olarak tercih edilmesinde etkilidir. Bu bileşenlerin (sandviç paneller) çoğu, yüzey malzemeleri ile petek ve köpük çekirdek malzemelerinden oluşmaktadır [9-11]. Özellikle açık hücreli çekirdek malzemeli sandviç kompozit paneller, kompozit malzemeye yüksek rijitlik ve özgül mukavemet gibi çok işlevli faydalar sağlar [12, 13]. Sandviç yapıların mekanik davranışı, performansı ve kırılma modları (sıkıştırma, kesme veya girinti hataları, ayrılma ve ezilme), malzeme özelliklerine ve ilgili bileşenlerinin geometrisine (yüzey levhaları ve çekirdek topoloji tasarımı) bağlıdır [4, 7]. Bileşen geometrisi ile yüksek performanslı sandviç kompozit paneller elde edilebilir [14-16]. Sandviç kompozit panellerde yüzey malzemelerinin sandviç içerisinde rijit malzemelerden oluşması, kayma ve eğilme gerilmelerine karşı dayanıklı olması ve düzlemlerin birbirinden ayrılmasına karşı dayanıklı olması gerekmektedir [17]. Petek sandviç yapılar, iki ince sert yüzey tabakası arasına yerleştirilmiş kalın bir çekirdek malzemedir. Petek çekirdek malzemesi sandviç panelin rijitlik ve enerji emme özelliklerini korurken, içi boş hücresel yapısı ile sandviç

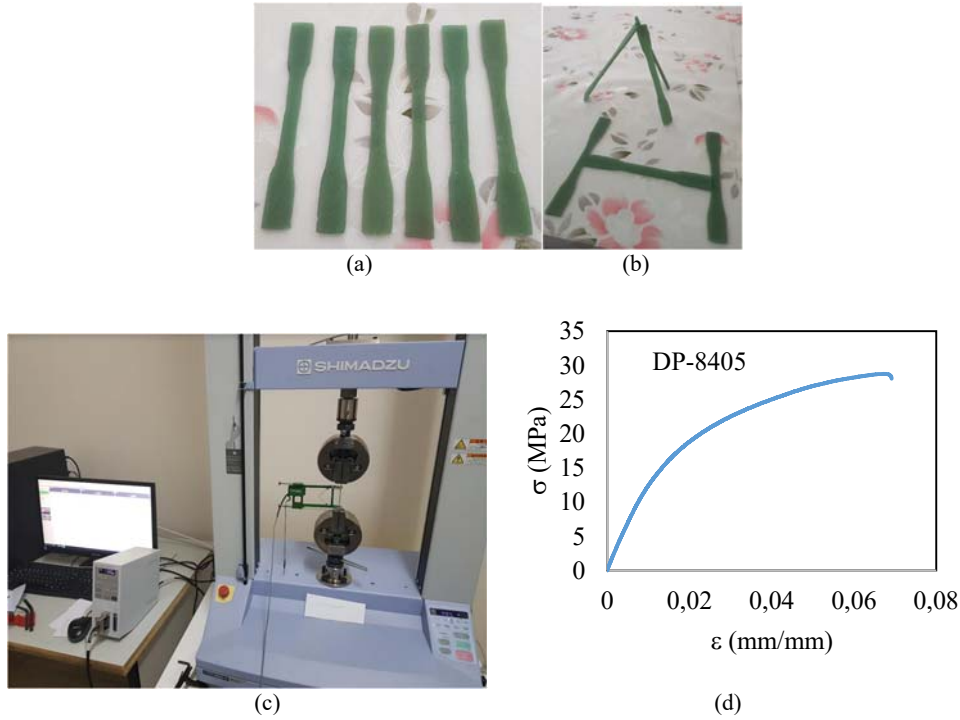
panele hafiflik özelliği kazandırmaktadır. Bu tür petek yapıları sandviç kompozit paneller, otomotiv ve havacılık gibi yüksek mukavemetin gerekli olduğu uygulamalarda geleneksel malzemeler yerine yaygın olarak kullanılmaktadır [17-19]. Çekirdek yapı geometrisi petek profilinde [20, 21] ve zincir, piramit oluklu [22], x tipi, kagome tipi, hibrit ve özgün tasarımlarda olabilir [23-26]. Bu çalışma, özgün bir çekirdek tasarımına sahip olan S şekilli 1050-O serisi alüminyum çekirdek yapıya sahip alt ve üst tabakası 316 paslanmaz çelik ve bağlayıcı eleman olarak DP-8405 akrilik yapıştırıcı kullanılan sandviç kompozit panelin farklı varyasyonlarının üç noktalı eğilme testleri deneysel ve ANSYS paket programı kullanılarak sonlu elemanlar analiziyle oluşturulan çözümlerle karşılaştırılmış, mekanik davranışları araştırılmıştır.

## 2. Deneysel Metot (Experimental Method)

Bu çalışmada yüzey tabakası olarak 1 mm kalınlığında 170x100 mm paslanmaz çelik-316, çekirdek malzemesi olarak ise alüminyum 1050A-0 alaşımı kullanılmıştır. Alt-üst plaka ile çekirdek arasında yapıştırma elemanı olarak DP-8405 akrilik yapıştırıcı kullanılmıştır. Alüminyum 1050A-0 ve paslanmaz çelik-316'nın fiziksel ve mekanik özellikleri tablo-1'de verilmiştir. ASTM D638-14 standardına göre yapıştırıcı numuneleri oluşturulmuş olup, 6 adet deney tekrarı yapılmıştır. Hesaplanan ortalama verilerle DP-8405 akrilik yapıştırıcının gerilme-şekil değiştirme grafiği şekil 1d' de verilmiştir.

1mm kalınlığında 170x100mm paslanmaz çelik-316 malzemeden imal edilen alt ve üst plakanın boyutları şekil 2'de verilmiştir.

Farklı büküm geometrik varyasyonları ile üretilecek olan çekirdek yapının S-core R10mm ölçüleri ile büküm öncesi ve sonrası sac ölçüleri şekil 3'te verilmiştir.

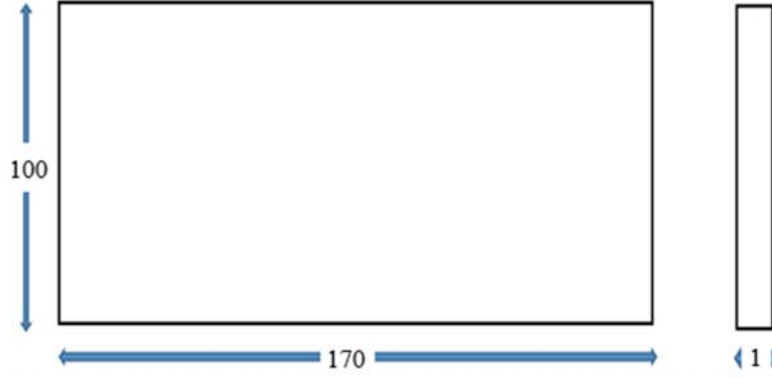


**Şekil 1.** (a) Çekme testi için oluşturulan yapıştırıcı numune 1. görünüm, (b) Çekme testi için oluşturulan yapıştırıcı numune 2. görünüm, (c) Çekme test cihazı, (d) DP-8405 akrilik yapıştırıcının gerilim-şekil değiştirme grafiği

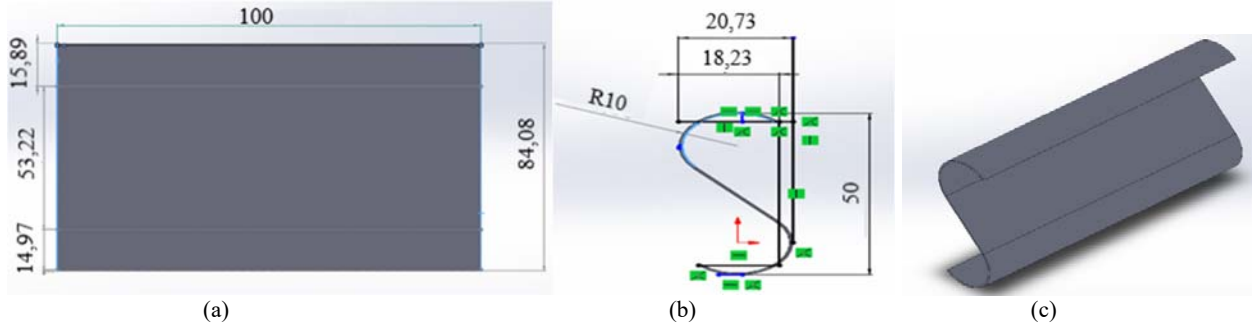
((a) 1st view of the adhesive sample created for the tensile test, (b) The 2nd view of the adhesive sample created for the tensile test, (c) The tensile test device, (d) Stress-strain plot of DP-8405 acrylic adhesive)

**Tablo 1.** Alüminyum 1050A-0 ve Paslanmaz çelik-316 alaşımlarının mekanik özellikleri [27-29]  
(Mechanical properties of Aluminum 1050A-0 and Stainless steel-316 alloys)

	Alüminyum 1050A ,O	Paslanmaz çelik-316
Yoğunluk	2710 kg/m <sup>3</sup>	7800 kg/m <sup>3</sup>
Akma mukavemeti	37.94 MPa	200 MPa
Kopma mukavemeti	80 MPa	515 MPa
Elastisite modülü	69 GPa	200 GPa
Uzama (%)	40	40
Kayma mukavemeti	50 MPa	82 GPa
Poisson oranı	0.33	0.275



**Şekil 2.** Alt ve Üst levha boyutları [30] (Bottom and Top plate dimensions)



**Şekil 3.** R10 mm için seçilen S-çekirdek; (a) büküm öncesi, (b) büküm ölçüleri, (c) büküm sonrası görünümü [30]  
(S-core selected for R10mm; (a) before bending, (b) bending dimensions, (c) post bending view)

**Tablo 2.** S-Çekirdekli Sandviç Alüminyum Kompozit Levha Varyasyonlarının Boyutları  
(Dimensions of S-Core Sandwich Aluminum Composite Sheet Variations)

Üst ve alt levha ölçüleri (mm)	Çekirdek yarıçapı R, (mm)	Çekirdek et kalınlığı t, (mm)	Çekirdekler arası mesafe (mm)	Ağırlık (gr)	Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )
100x170x1	7.5	0.6	25	12.4	14.0271
		0.7		12.6	14.2534
		0.8		13.35	15.1018
	10	0.6		13.1	14.819
		0.7		13.35	15.1018
		0.8		14.3	16.1764
	12.5	0.6		13.45	15.2149
		0.7		13.6	15.3846
		0.8		14.85	16.7986

S-core sandviç alüminyum kompozit levha varyasyonlarının boyutları Tablo 2' de gösterilmiştir. Bu çalışmada, üç farklı eğrilik yarıçapı ve üç farklı et kalınlığı değerleri için test ve analiz yapılmıştır.

Şekil-5'teki gibi alt-üst plaka ile çekirdek malzeme arasında DP-8405 bağlayıcı yapıştırıcı kullanılarak oluşturulmuştur. Oluşturulan

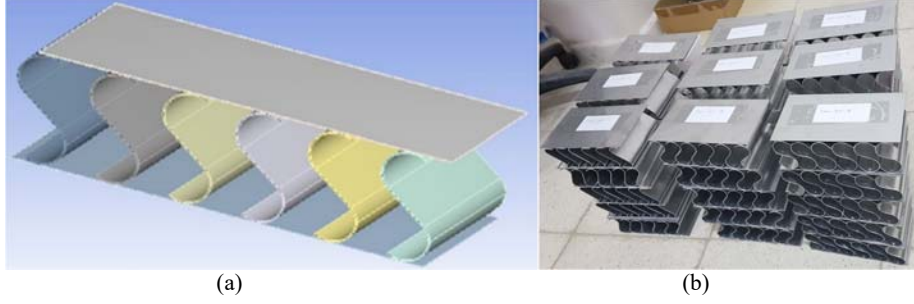
sandviç kompozit levha, üç nokta eğilme testi analizine tabi tutulmuş olup analizler ANSYS Workbench 2021 R1 paket programı kullanılarak yapılmıştır. Üç nokta eğilme analizinde yük kademeler halinde verilmiş ve her kademede 50N artırılarak 10 kademede toplam 500N yük uygulanmıştır. Üç nokta eğilme analizine ilişkin boyutlar ve sınır koşulları şekil 5'te verilmiştir.

Üç nokta eğme analizi sonucunda farklı eğrilik ve kalınlıklara sahip alüminyum çekirdekli kompozit levhalar için elde edilen yük-sehim grafikleri şekil 6'da görülen üst levha üst orta hattının boyunca [AB hattı], üst levhanın altı orta hattının boyunca [CD hattı], üst yapıştırıcının üstü orta hattı boyunca [EF hattı] sırasıyla incelenmiştir.

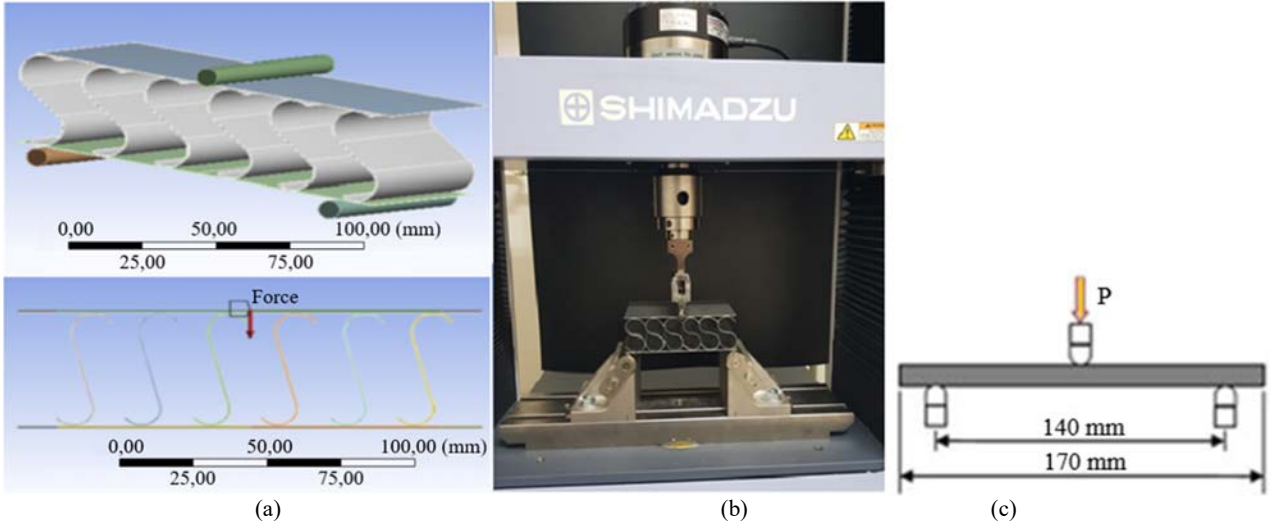
### 3. Sonuçlar ve Tartışmalar (Results and Discussions)

Üç nokta eğme analizi ve deneysel uygulama sonucu elde edilen araştırma verileri aşağıda belirtilmiştir.

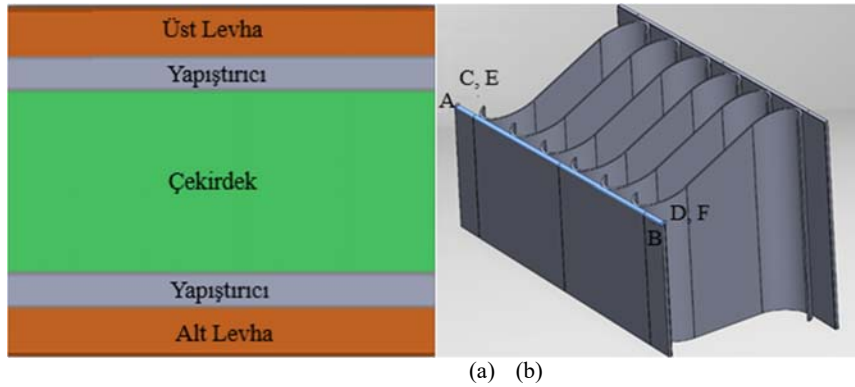
0.6 mm et kalınlıklı R7.5 mm yarıçaplı alüminyum çekirdekli 1 mm kalınlıklı 1050A-0, paslanmaz çelik-316 alt ve üst örtülü sandviç kompozit levhanın çökmesi Şekil 7'de ve 0.7 mm et kalınlıklı R7.5 mm yarıçaplı alüminyum çekirdekli 1 mm kalınlıklı 1050A-0 paslanmaz çelik-316 alt ve üst örtülü sandviç kompozit levhanın von-Mises eşdeğer gerilmesi Şekil 8'a'da görülmektedir. Şekil 7'de çökme görüntüsü incelendiğinde beklendiği gibi en büyük çökme sandviç kompozitin orta kısmında oluşmuştur. Altta paslanmaz çelik örtü incelendiğinde çökme çok az meydana gelmiştir. S şekilli çekirdek malzemelerde de orta hatta yaklaşık renkler yeşilden kırmızıya



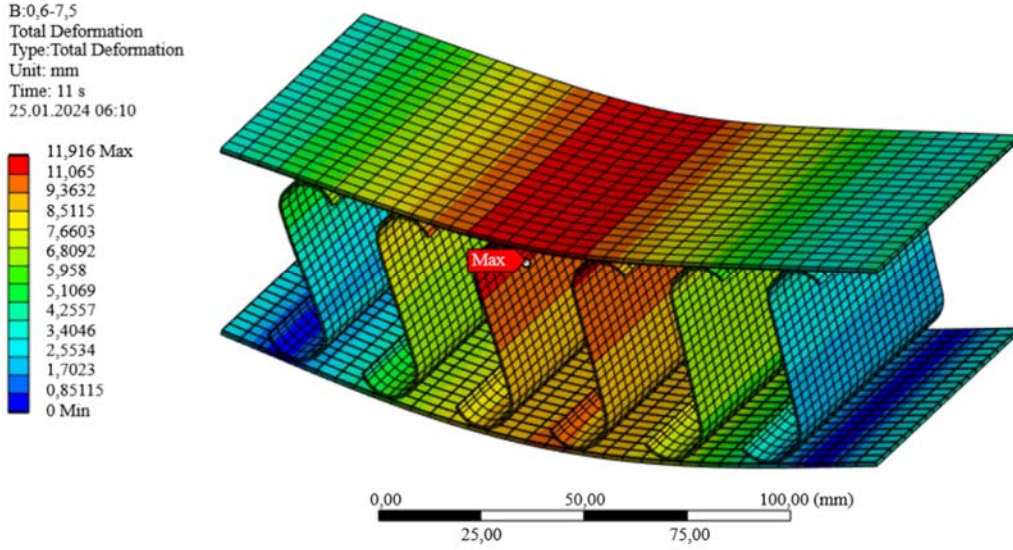
Şekil 4. S-çekirdekli alüminyum sandviç kompozit panel (a) çizim görünümü, (b) test numuneleri [29]  
(S-core aluminum sandwich composite panel; (a) drawing view, (b) test specimens)



Şekil 5. (a) Ansys workbench analizi ile üç nokta eğme testi kuvvet adımlı diyagramı ve analiz kurulumu [31], (b) Test cihazında S-çekirdekli alüminyum kompozit panel, (c) üç nokta eğme testi ölçülendirilmesi  
(a) Three-point bending test force step diagram and analysis setup with Ansys workbench analysis, (b) S-core aluminum composite panel on the test device, (c) three-point bending test dimensioning)



Şekil 6. Sandviç kompozit panel; (a) iç yapısı, (b) A-B, C-D ve E-F hatları  
(Sandwich composite panel; (a) internal structure, (b) A-B, C-D and E-F lines)



Şekil 7. 0.6 mm et kalınlığına ve R7.5 mm yarıçapa sahip S çekirdekli sandviç kompozit panelin toplam deformasyonu  
(Total deformation of S-core sandwich composite panel with 0.6 mm wall thickness and R7.5 mm radius)

yaklaşmakta, bu da orta hattaki çekirdek malzemelerin de kenar malzemelerle göre daha fazla çöktüğünü göstermektedir. Şekil 8a'daki von-Mises eşdeğer gerilmeler incelendiğinde, en büyük eşdeğer gerilmelerin sandviç kompozitin ortasında olduğu ve bu da beklentilerle uyumlu olduğu görülmektedir. Çünkü üç nokta eğilme testinde eşdeğer gerilmelerde baskın gerilmelerin aksel doğrultudaki normal gerilmeler olduğu bilinmektedir. Aksel normal gerilmeler de ( $\sigma_x$ ) en büyük eğilme momentin olduğu noktada meydana gelmektedir. Üç nokta eğilme testi yüklemesinde en büyük eğilme momenti, kuvvetin uygulandığı ve sandviç kompozitin ortasında oluşmaktadır. Bundan dolayı Şekil 8'de bu hat kırmızı görülmektedir. Hem üst örtüde hem de sandviç kompozitin geri kalan kısmında eşdeğer ( $\sigma_{eqv}$ ) gerilmeler giderek azalmaktadır.

Çekirdek eğrilik yarıçapları 7.5, 10 ve 12.5 mm ve çekirdek kalınlıkları 0.6, 0.7 ve 0.8 mm olan alüminyum çekirdekli kompozit levhalar için üç nokta eğilme test ve analiz sonucunda elde edilen hasar yükleri Tablo 3'te verilmiştir.

Şekil 9'daki analiz sütunu Ansys analiz sonuçlarını ifade ederken Test sütunu ise deneysel çalışma sonuçlarını ifade etmektedir. Üç farklı yarıçap ve üç farklı çekirdek et kalınlığıyla oluşturulan varyasyonların her biri için deneyler 1mm/min çalışma hızında 5 tekrar olacak şekilde yapılmış ve deneylerde verilerin ortalaması alınarak tablo oluşturulmuştur. Tablodaki hasar yükleri incelendiğinde, çekirdek kalınlıkları arttıkça hasar yüklerinin arttığı görülmektedir. Bunun nedeni, çekirdek kalınlıkları arttıkça eğilme rijitliğinin artması ve hasar yüklerinin artmasıdır. Benzer şekilde, S-şekilli çekirdek malzemesinin eğrilik yarıçapları arttıkça, hasar yükleri azalır. Bu nedenle  $1/\rho = M/EI$  ifadesinde eğrilik yarıçapı arttıkça  $M/EI$  ifadesi azalır; yani, hasar deformasyonlarına ve hasar gerilmelerine daha düşük eğilme momenti ve dolayısıyla daha düşük hasar yükü ile ulaşılır.

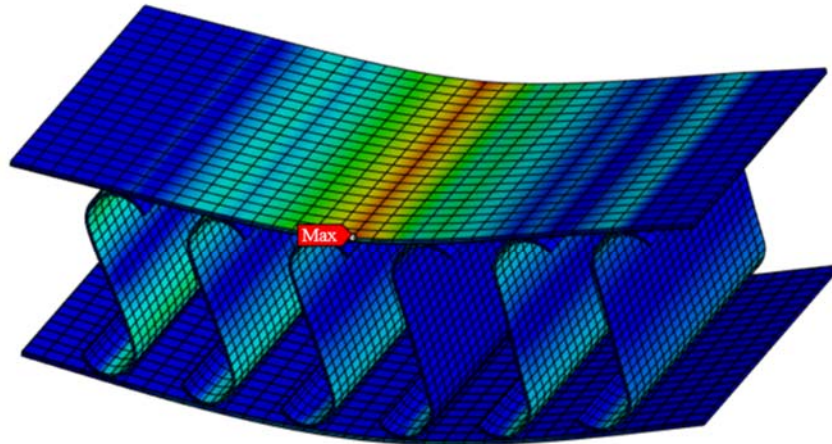
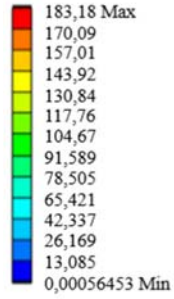
Deneysel yük-deplasman eğrilerinden de anlaşılacağı gibi yoğunluk arttıkça panel numunelerinin yük taşıma kapasiteleri artmıştır. Şekil-10'da görüldüğü gibi varyasyonu en yüksek yük taşıma kapasitesine, a varyantı ise en düşük yük taşıma kapasitesine sahiptir. 7.5 mm çekirdek yarıçapına, 0.6, 0.7 ve 0.8 mm et kalınlığına ve S şeklinde 50 mm hücre yüksekliğine sahip sandviç kompozitin A-B çizgisi, C-D çizgisi ve E-F çizgisi boyunca sehim değerleri; Sırasıyla Şekil 10a, Şekil 10b ve Şekil 10c. Bundan sonraki sehim değerleri ve gerilme grafikleri, sandviç kompozitin tüm varyasyonlarda taşıyabileceği en

düşük hasar yükü olan  $F=110$  N eğilme yükünde elde edilmiştir. A-B çizgisi, sandviç kompozitin üst kapağının (üst çelik levha) üst orta hattını gösterirken, C-D çizgisi, sandviç kompozitin üst kapağının (üst çelik levha) alt orta hattını gösterir (Şekil 6). E-F çizgisi C-D çizgisi ile çakışır ve yapışkan yüzeydeki çizgiyi gösterir. Şekil 10a'da verilen 0,6 mm çekirdek et kalınlığına ve 50 mm hücre yüksekliğine sahip sandviç kompozitin A-B hattı boyunca sehimleri incelendiğinde, sehimlerin A noktası çevresinde sıfırın biraz üzerinde gerçekleştiği görülmektedir. Bu noktada, üst plaka A noktasında saat yönünün tersine bir miktar eğim gösterir. Plakanın ortasına doğru gidildikçe, çökme kademeli olarak arttı ve orta noktada maksimuma ulaştı. B noktasına yaklaştığımızda, çökme önce sıfır oldu ve sonra plakanın B noktası etrafında pozitif oldu. Bunun nedeni bükme plakalarının uçlarında oluşan eğimdir. S şeklindeki çekirdeklerin A noktasından B noktasına doğrultusu nedeniyle B noktasında oluşan eğim, A noktasında oluşan eğimden daha yüksektir.

Çekirdek kalınlığının sandviç kompozit levhanın sehim değerlerine etkisi açısından grafikler incelendiğinde hafif nüveli kompozit levhaların daha fazla sehim yaptığı görülmektedir. Diğer bir deyişle, çekirdek kalınlığı arttıkça plakaların sehimi giderek azalmaktadır. Bunun nedeni, çekirdek malzemelerin kalınlığı arttıkça atalet momentlerinin artmasıyla eğilmeye karşı direncinin artmasıdır. Bu, daha az bükülme ve bükülme ile sonuçlanır.

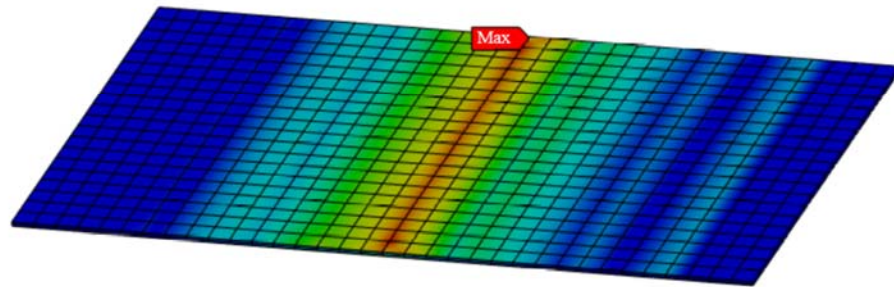
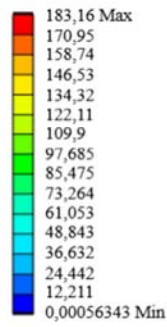
Çekirdek yarıçapı 10 ve 12.5 mm, duvar kalınlığı 0.6, 0.7 ve 0.8 mm ve S şeklinde 50 mm hücre yüksekliğine sahip sandviç kompozitin A-B çizgisi, C-D çizgisi ve E-F çizgisi boyunca sapma değerleri; Şekil 12 ve Şekil 13'de S sehimi görülmektedir, sehimler incelendiğinde S şeklindeki maçaların r yarıçapı arttıkça sehimler artmaktadır. R yarıçaplarındaki artış sandviç kompozit levhanın sapması üzerindeki etkileri Şekil 13, Şekil 14, Şekil 15'te daha açık bir şekilde görülmektedir. Şekiller incelendiğinde plakanın başlangıcındaki (A noktasındaki) S sapmasının r yarıçapına bağlı olarak daha fazla değiştiği ve plakanın sonuna yaklaştıkça bu S sapmasının giderek azaldığı görülmektedir. Bunun nedeni, S şekillerinin yönlerinin B noktası tarafına bakması ve yüklem sırasında levhanın üst kapağının hafifçe B tarafına doğru kayarken daha fazla eğilmesidir. Ayrıca, r yarıçapı 7.5 mm'den 10 mm'ye yükseldiğinde sapmalardaki artış, yarıçap r'nin 10 mm'den 12.5 mm'ye yükseldiği zamanki sapmalardaki artıştan daha azdır. Şekil 13a'da görüleceği üzere, yarıçap R10 mm'den 12.5 mm'ye yükseldiğinde, çökme miktarında %75,19' lik artış olmuştur. Bunun nedeni, yarıçap arttıkça bükülme sertliğinin kademeli olarak azalmasıdır.

A: Static Structural  
Equivalent Stress  
Type: Equivalent (von-Mises)  
Stress  
Unit: MPa  
Time: 4,4 s  
25.01.2024 06:42



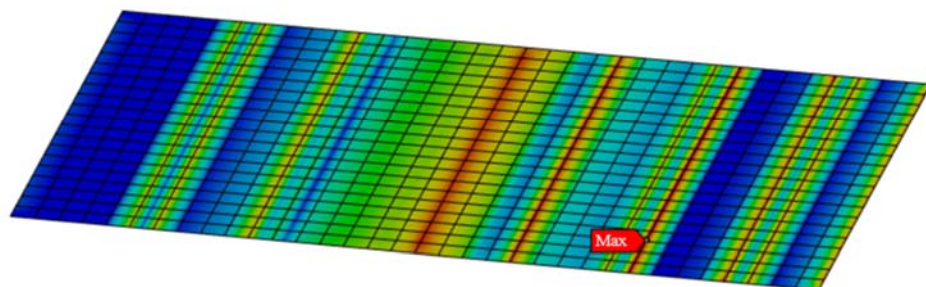
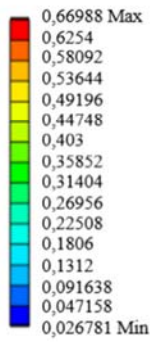
(a)

A: Static Structural  
Equivalent Stress  
Type: Equivalent (von-Mises) Stress  
Unit: MPa  
Time: 10 s  
25.01.2024



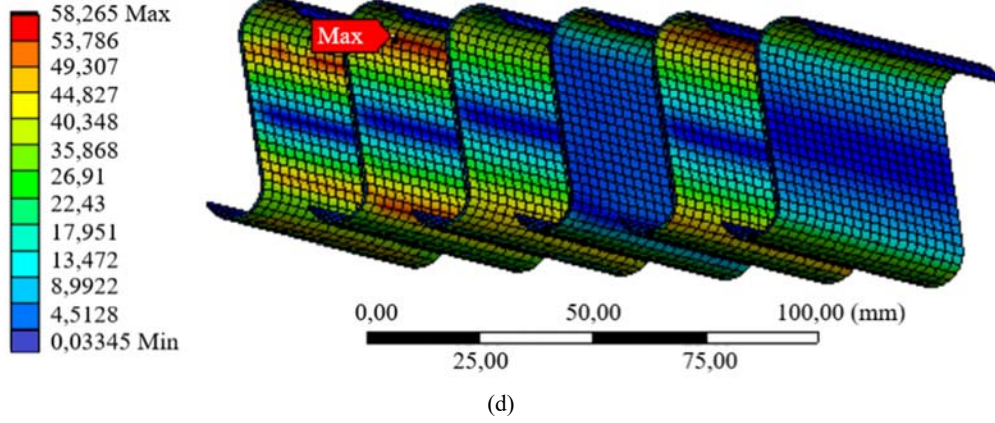
(b)

A: Static Structural  
Equivalent Stress  
Type: Equivalent (von-Mises) Stress  
Unit: MPa  
Time: 10 s  
25.01.2024 15:58



(c)

A: Static Structural  
 Equivalent Stress  
 Type: Equivalent (von-Mises) Stress  
 Unit: MPa  
 Time: 10 s  
 25.01.2024 17:11

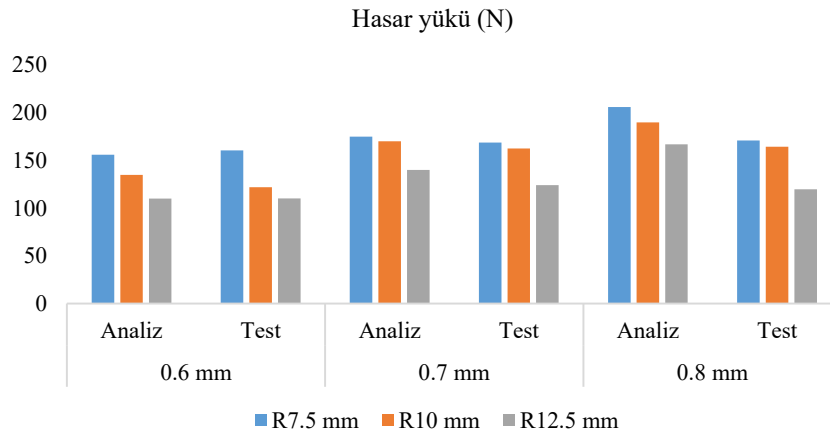


**Şekil 8.** 0.7 mm duvar kalınlığı ve R7.5 mm yarıçaplı alüminyum çekirdekli sandviç kompozitin von-Mises gerilmesi; a) sandviç kompozit detay görünüm, b) üst levha detay görünüm, c) üst yapıştırıcı detay görünüm, d) S çekirdekler detay görünüm ( von-Mises stress of aluminum core sandwich composite with 0.7 mm wall thickness and R7.5 mm radius; a) sandwich composite detail view, b) Top plate detail view, c) Top adhesive detail view, d) S cores detail view)

**Tablo 3.** 0.6, 0.7 ve 0.8 mm et kalınlığı, R7.5, R10 ve R12.5 mm yarıçaplı S çekirdekli sandviç kompozit plaka analizi ve test numunelerinin hasar yükleri

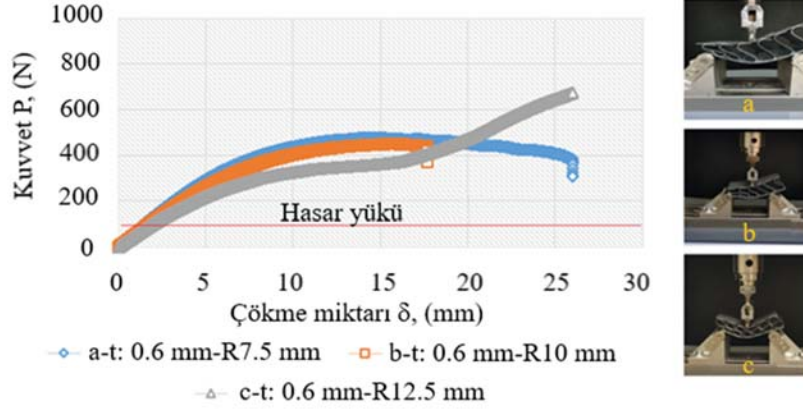
(Analysis of S-core sandwich composite plate with 0.6, 0.7 and 0.8 mm wall thickness, R7.5, R10 and R12.5 mm radius and failure loads of test specimens)

Değerler	Hasar yükü (N)					
	0.6 mm		0.7 mm		0.8 mm	
	Analiz	Test	Analiz	Test	Analiz	Test
R7.5 mm	156	160.6623	175	168.7845	206	170.962
R10 mm	135	121.9114	170	162.6174	190	164.3499
R12.5 mm	110	110.1176	140	124.1684	167	119.7815

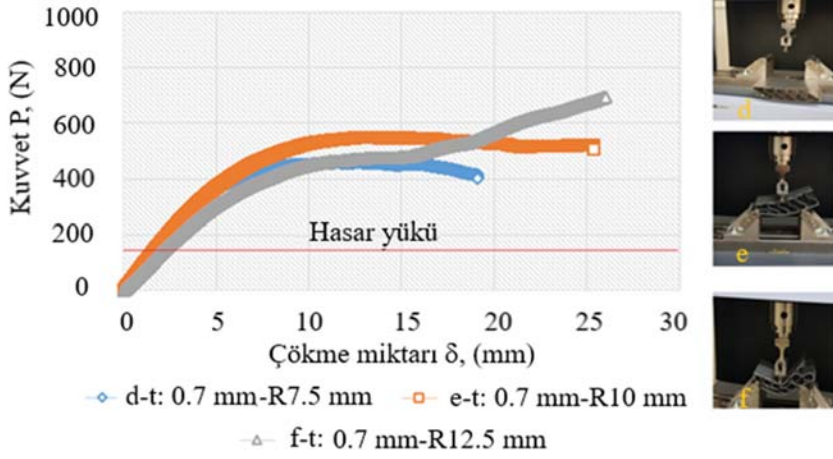


**Şekil 9.** Çalışma gruplarına ait analiz ve test veri histogramı (Analysis and test data histogram of study groups)

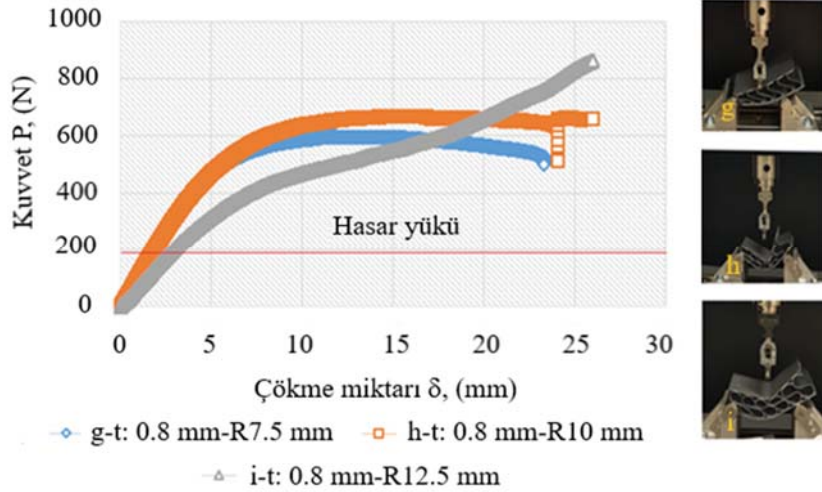




(a)

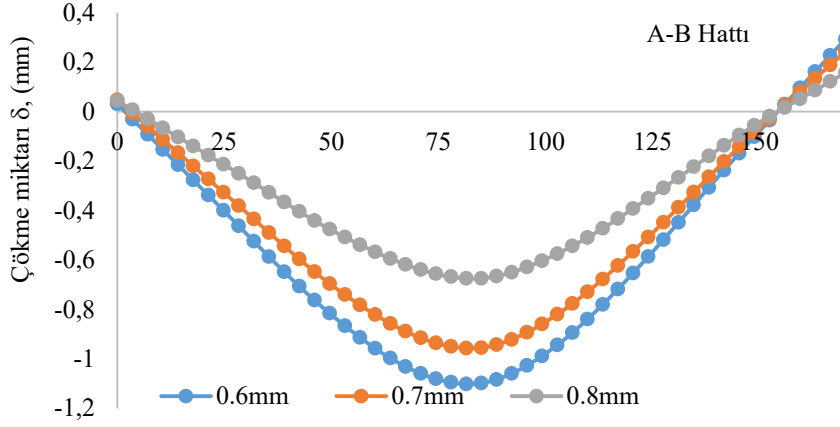


(b)

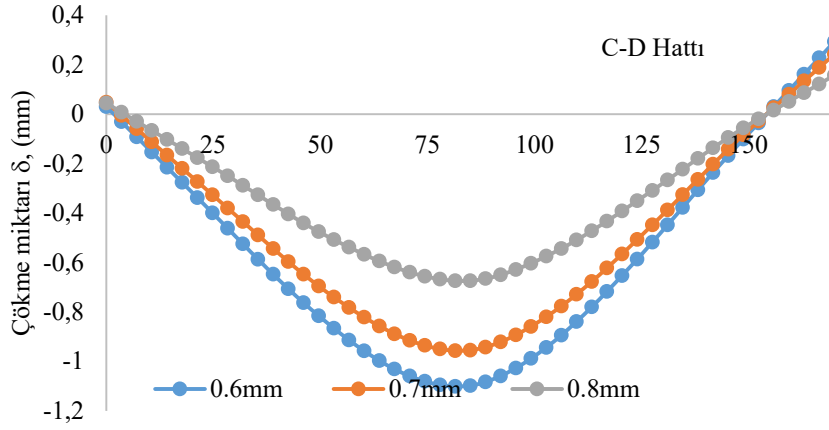


(c)

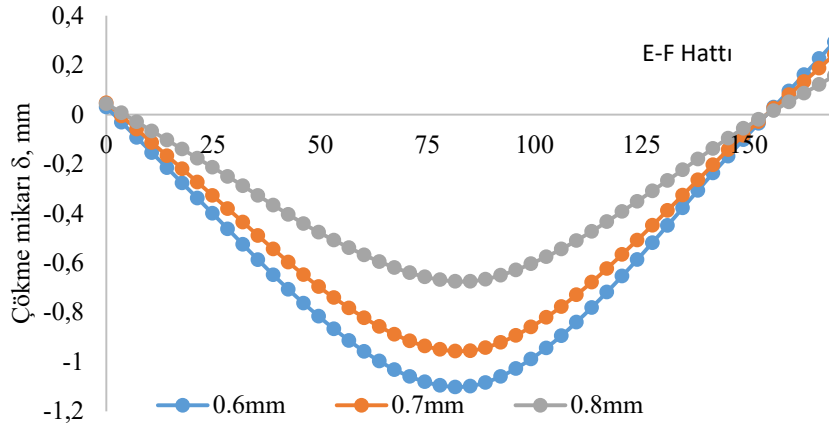
**Şekil 10.** S-core sandviç panellerin deneysel yük-deplasman eğrileri ve deneysel görüntüleri; (a) a,b,c test grupları, (b) d,e,f test grupları, (c) g,h,i test grupları (Experimental load-displacement curves and experimental images of S-core sandwich panels; (a) a,b,c specimens groups, (b) d,e,f specimens groups, (c) g,h,i specimens groups)



(a)

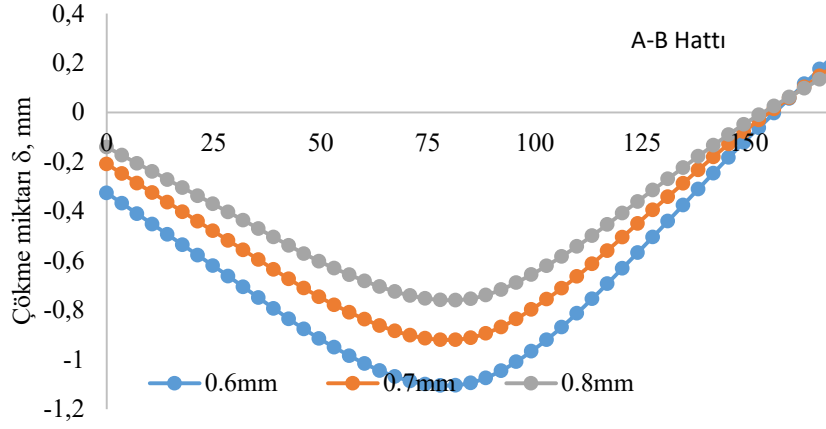


(b)

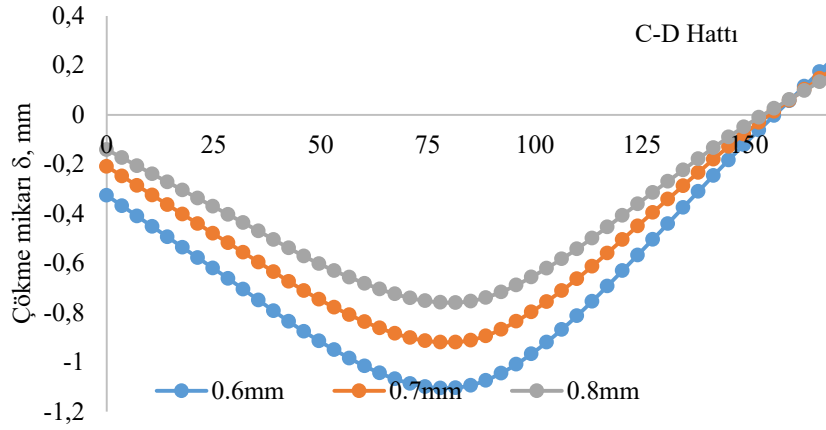


(c)

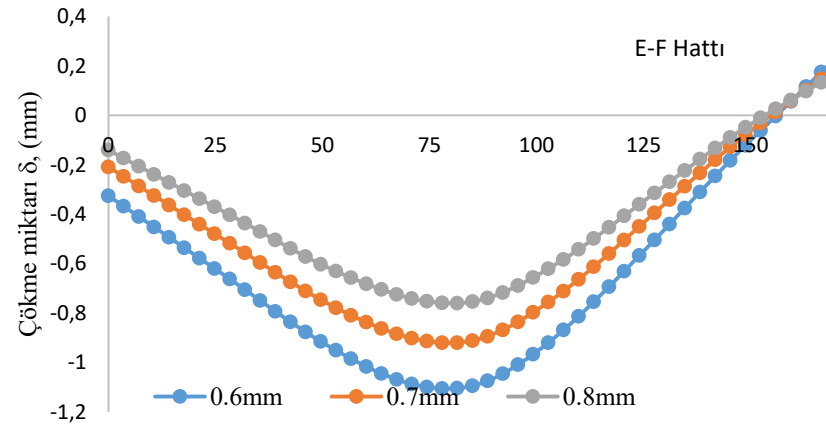
**Şekil 11.** 7.5 mm çekirdek yarıçaplı,  $t=0.6, 0.7$  ve  $0.8$  mm et kalınlığına, S şekilli 50 mm hücre yüksekliğine sahip sandviç kompozitin sehim değerleri; a) A-B hattı boyunca, b) C-D hattı boyunca; c) E-F hattı boyunca (Deflection values of sandwich composite with 7.5 mm core radius,  $t=0.6, 0.7$  and  $0.8$  mm wall thickness, S-shaped 50 mm cell height; a) along the line A-B, b) along the line C-D; c) Along the E-F line)



(a)

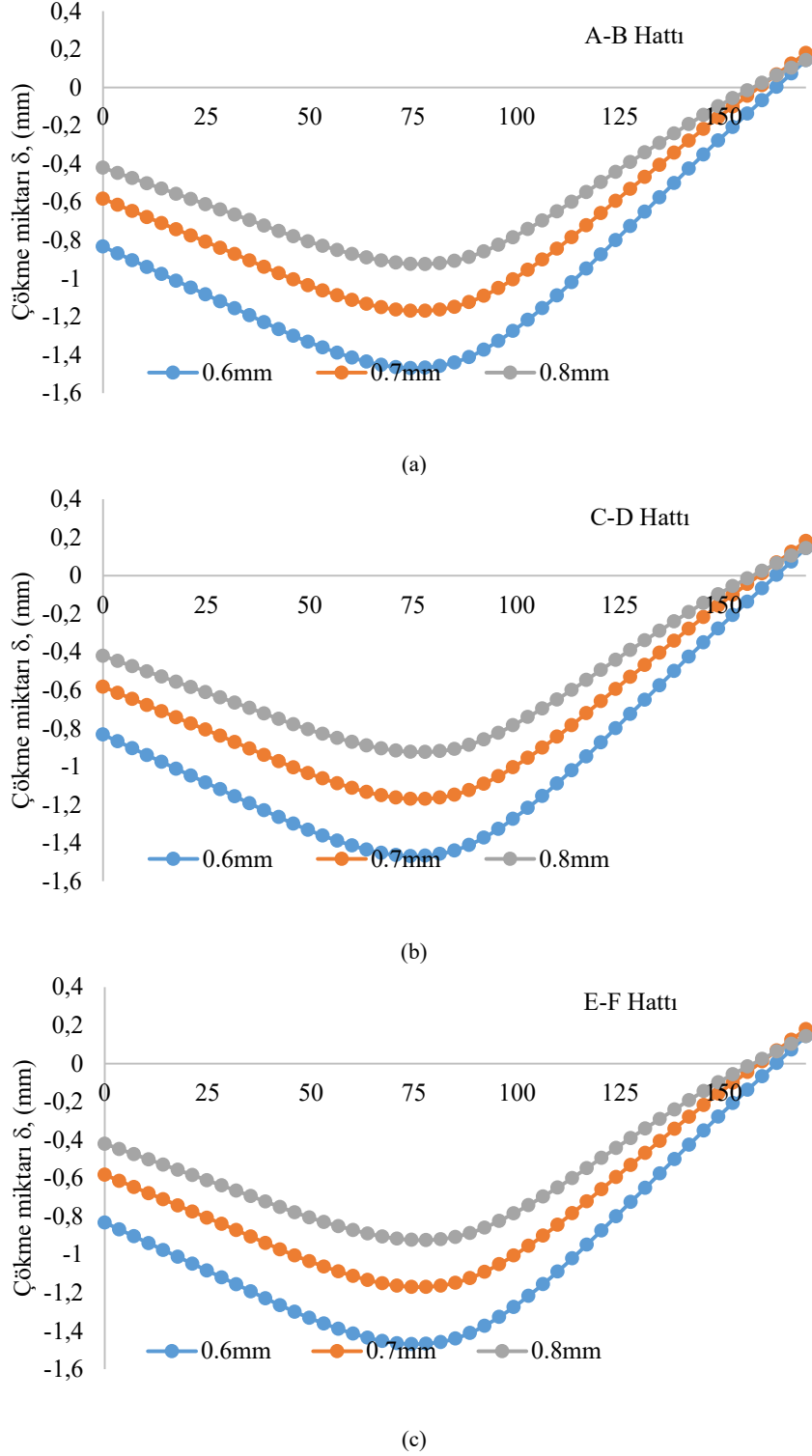


(b)

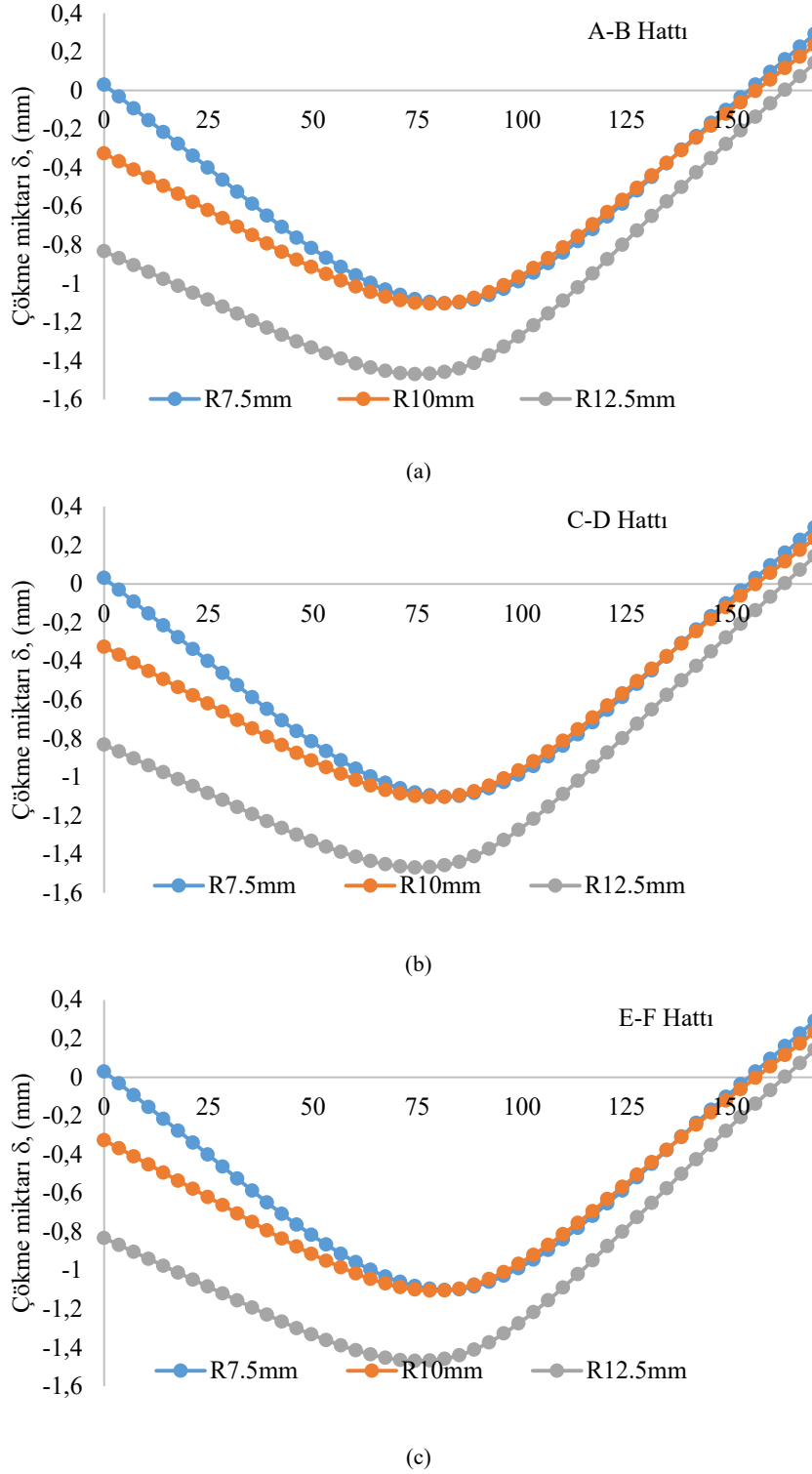


(c)

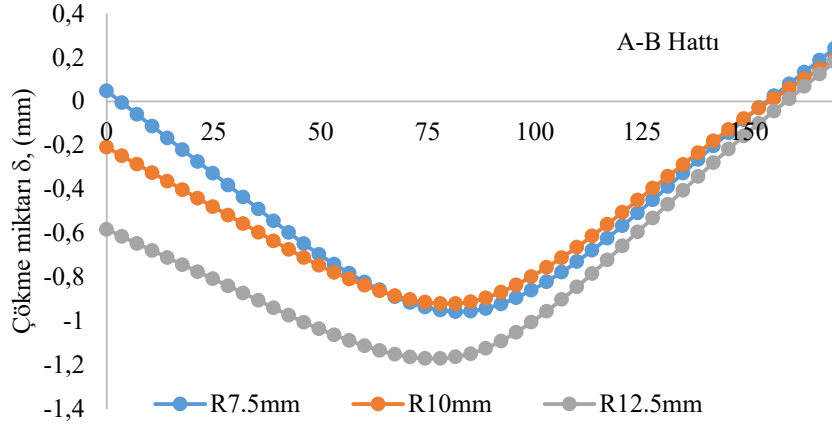
**Şekil 12.** 10 mm çekirdek yarıçaplı,  $t=0.6, 0.7$  ve  $0.8$  mm et kalınlığına, s şeklinde 50 mm hücre yüksekliğine sahip sandviç kompozitin sehim değerleri; a) A-B hattı boyunca, b) C-D hattı boyunca, c) E-F hattı boyunca  
(The deflection values of the sandwich composite with a core radius of 10 mm, a wall thickness of  $t=0.6, 0.7$  and  $0.8$  mm, and a cell height of 50 mm in s-shape; a) along the line A-B, b) along the line C-D, c) Along the E-F line)



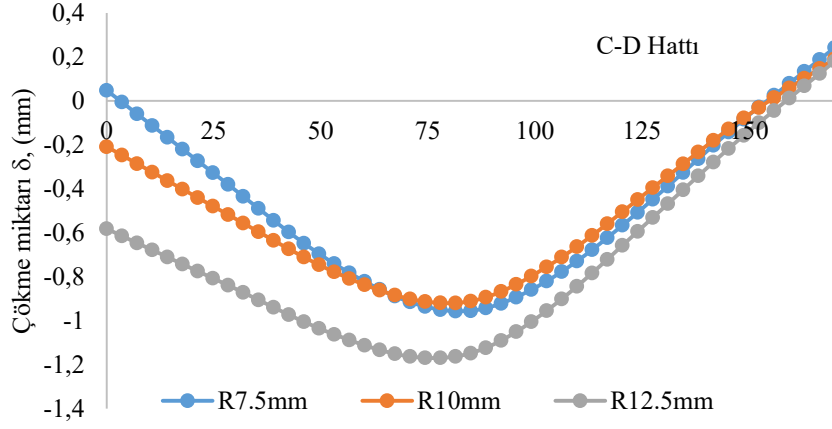
**Şekil 13.** 12.5 mm çekirdek yarıçaplı,  $t=0.6, 0.7$  ve  $0.8$  mm et kalınlığına, s şeklinde 50 mm hücre yüksekliğine sahip sandviç kompozitin sehim değerleri; a) A-B hattı boyunca, b) C-D hattı boyunca, c) E-F hattı boyunca  
 (The deflection values of the sandwich composite with a core radius of 12.5 mm, a wall thickness of  $t=0.6, 0.7$  and  $0.8$  mm, and a cell height of 50 mm in s-shape; a) along the line A-B, b) along the line C-D, c) Along the E-F line)



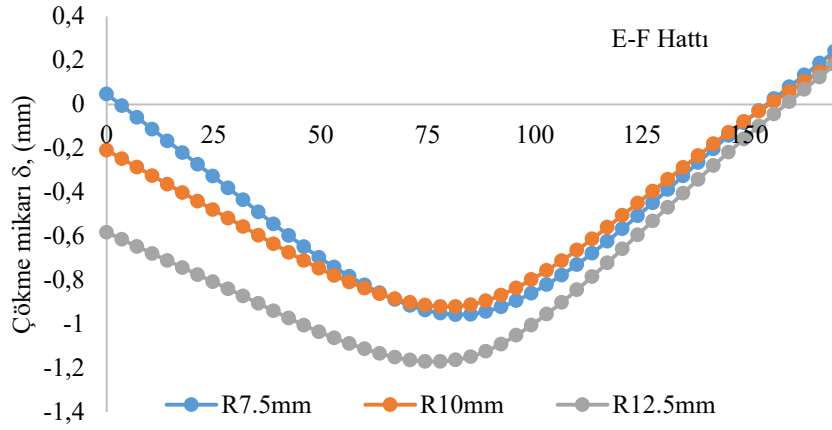
**Şekil 14.** 0,6 mm çekirdek et kalınlığına, R=7.5, 10 ve 12.5 mm yarıçapa ve s şeklinde 50 mm hücre yüksekliğine sahip sandviç kompozitin sehim değerleri; a) A-B hattı boyunca, b) C-D hattı boyunca, c) E-F hattı boyunca  
 (The deflection values of the sandwich composite with a core wall thickness of 0.6 mm, a radius of R=7.5, 10 and 12.5 mm and a cell height of 50 mm in s-shape; a) along the line A-B, b) along the line C-D, c) Along the E-F line)



(a)

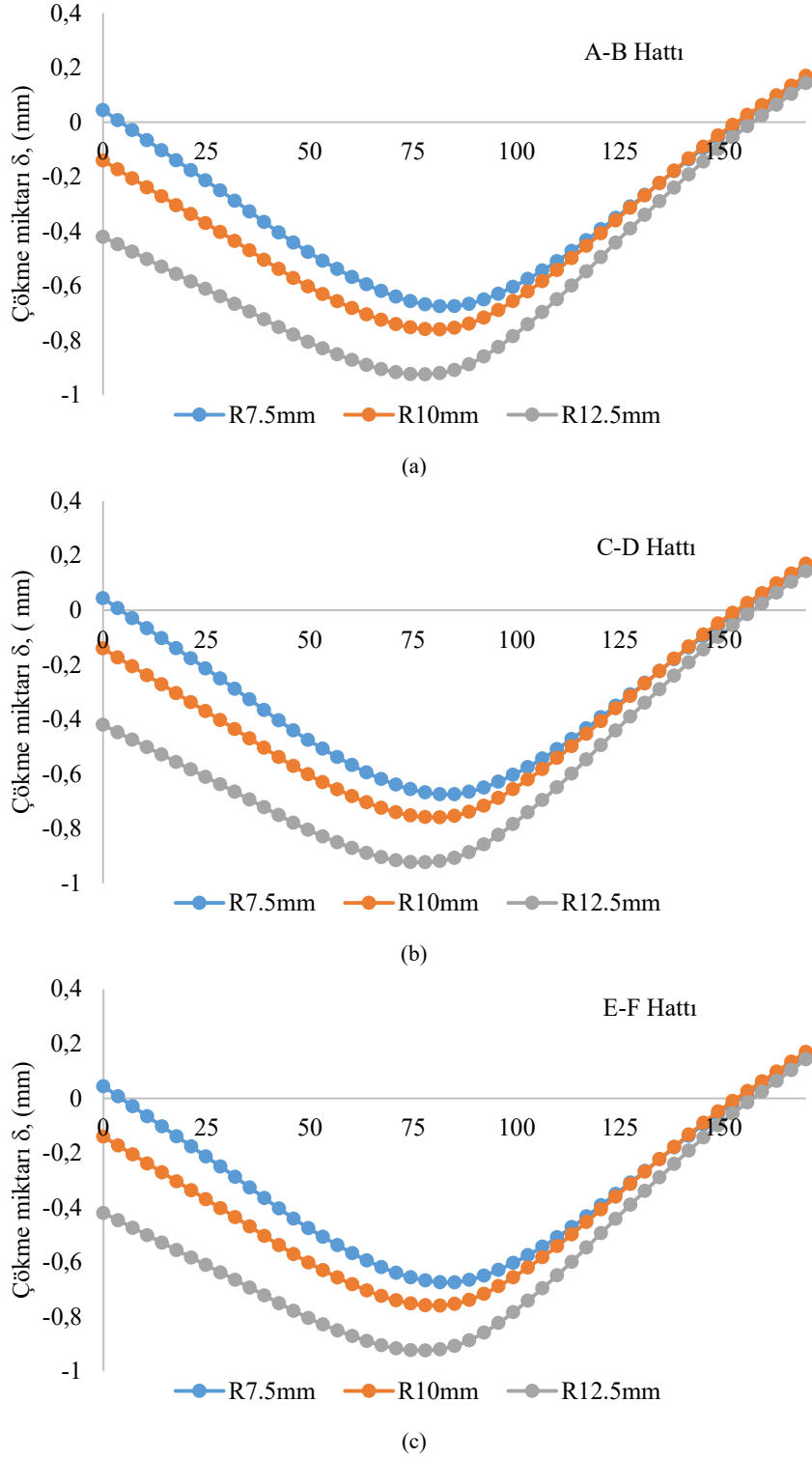


(b)



(c)

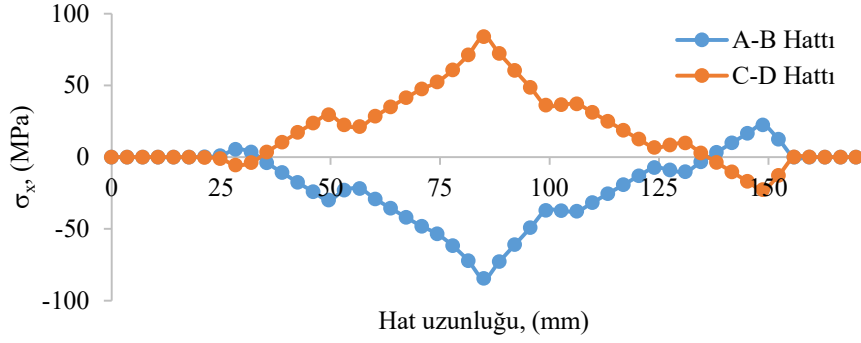
**Şekil 15.** 0.7 mm çekirdek et kalınlığı, R=7.5, 10 ve 12.5 mm yarıçaplı ve s şekilli 50 mm hücre yüksekliğine sahip sandviç kompozitin sehim değerleri; a) A-B hattı boyunca, b) C-D hattı boyunca, c) E-F hattı boyunca  
(Deflection values of sandwich composite with 0.7 mm core wall thickness, R=7.5, 10 and 12.5 mm radius and 50 mm s-shaped cell height; a) along the line A-B, b) along the line C-D, c) along the line E-F)



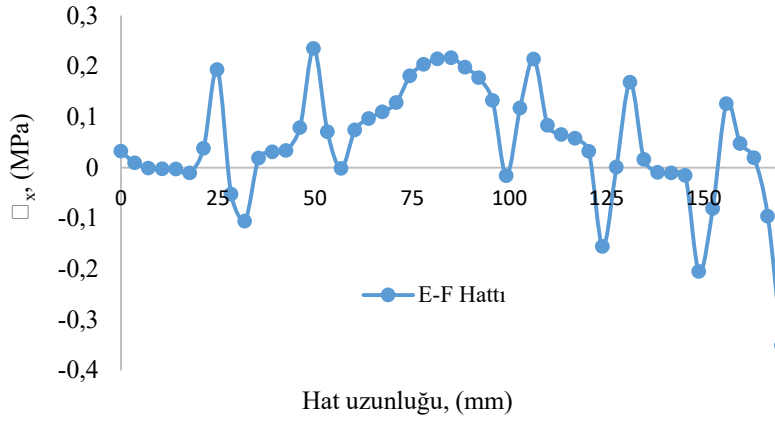
**Şekil 16.** 0.8 mm çekirdek et kalınlığı, R=7.5, 10 ve 12.5 mm yarıçaplı ve s şekilli 50 mm hücre yüksekliğine sahip sandviç kompozitin sehim değerleri; a) A-B hattı boyunca, b) C-D hattı boyunca, c) E-F hattı boyunca  
(Deflection values of sandwich composite with 0.8 mm core wall thickness, R=7.5, 10 and 12.5 mm radius and 50 mm s-shaped cell height; a) along the line A-B, b) along the line C-D, c) along the line E-F)

Yukarıda belirtilmiş olan sandviç kompozitin  $\sigma_x$ ,  $\sigma_z$  ve  $\tau_{xz}$  gerilmelerine dağılımları sırasıyla Şekil 17, Şekil 18 ve Şekil 19' da verilmiştir. Şekil 17 'deki AB ve CD çizgileri boyunca  $\sigma_x$  gerilme dağılımları incelendiğinde, her iki hat için gerilme dağılımları üst

plakanın üst ve alt yüzelerindeki gerilmelerdir. Beklendiği gibi, üst plakanın üst yüzelerindeki  $\sigma_x$  gerilmesi sıkıştırıcı bir karaktere sahiptir ve plakanın merkezine yaklaştıkça mutlak bir değer olarak artmaktadır. Plakanın merkezinde maksimum olduğu görülmektedir.

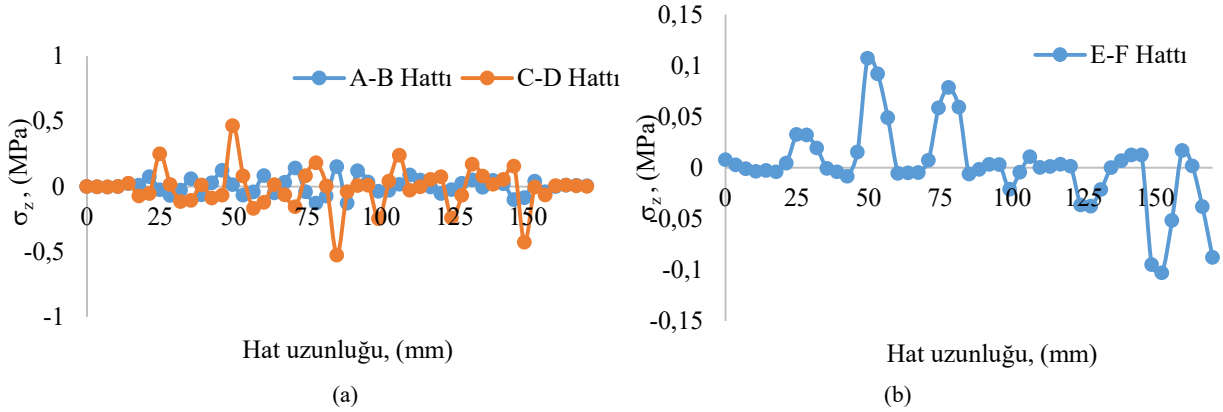


(a)

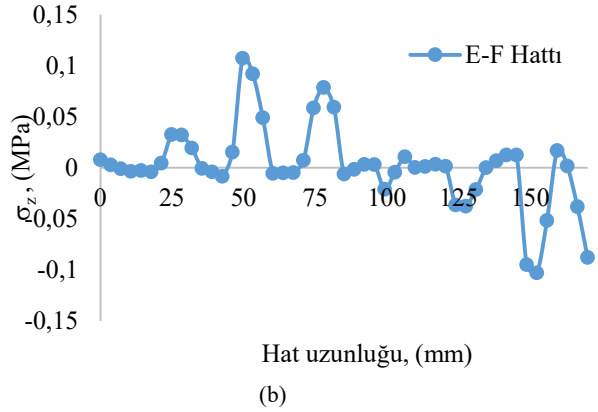


(b)

**Şekil 17.** 0.7mm çekirdek et kalınlığı, R7.5mm eğrilik yarıçapı ve s-şekilli 50mm hücre yüksekliğinde sandviç kompozitin farklı çizgilerindeki  $\sigma_x$  gerilme eğrileri; a) A-B ve C-D çizgileri boyunca, b) E-F çizgisi boyunca (Stress curves  $\sigma_x$  in different lines of sandwich composite with 0.7mm core wall thickness, R7.5mm radius of curvature and s-shaped 50mm cell height; a) along lines A-B and C-D, b) along line E-F)



(a)



(b)

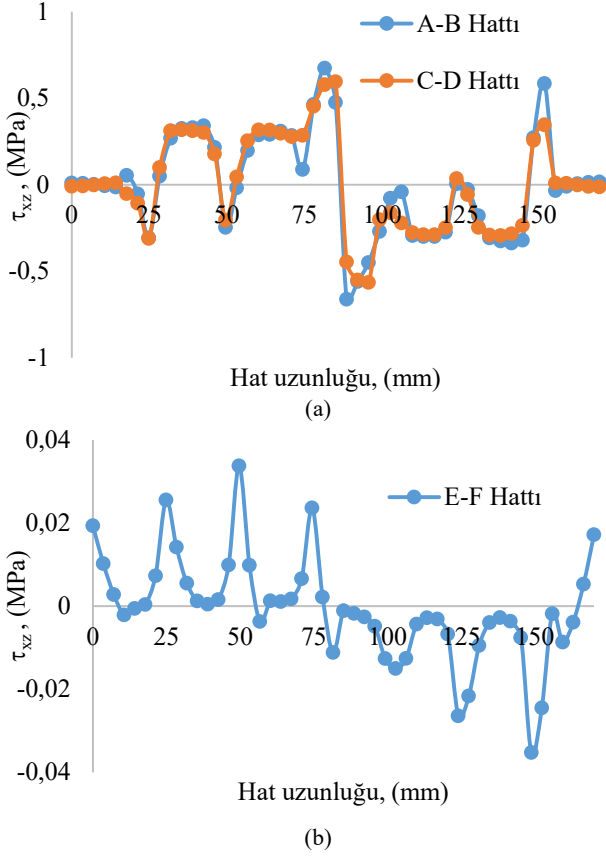
**Şekil 18.** Farklı hatlarda 0.7mm çekirdek et kalınlığı, R7.5mm eğrilik yarıçapı ve s-şekilli 50mm hücre yüksekliğinde sandviç kompozitin  $\sigma_z$ -gerilme eğrileri; a) A-B ve C-D çizgileri boyunca, b) E-F çizgisi boyunca (σz-strain curves of sandwich composite with 0.7mm core wall thickness, R7.5mm radius of curvature and s-shaped 50mm cell height in different lines; a) Along A-B and C-D lines, b) Along E-F line)

Benzer şekilde, üst plakanın (C-D çizgisi) alt yüzeyine ait stres  $\sigma_x$  de beklendiği gibi bükülmüş plakanın alt yüzeyindeki liflerin uzaması nedeniyle çekme karakterindedir. Plakanın merkezine yaklaştıkça arttığı ve plakanın merkezinde en yüksek değere ulaştığı görülmektedir. Bunun nedeni, üç nokta eğilme testinde kenarlarda

eğilme momentinin sıfır olması ve merkeze yaklaştıkça lineer olarak artması ve merkezde maksimum olmasıdır. E-F hattındaki gerilmeler hat boyunca dalgalanır çünkü gerilmeler çekirdek malzemelerin birleşme bölgelerinde artar ve diğer bölgelerde azalır. Bu hat boyunca gerilmelerin çok düşük olduğu da gözlenmiştir. Şekil 18, Şekil 19'daki



$\sigma_x$  ve  $\tau_{xz}$  gerilmeleri incelendiğinde, bu gerilmelerin yapışkan tabakadaki  $\sigma_x$  gerilmeleri gibi minimal gerilmeler olduğu ve S-çekirdek malzemelerin yüzey boyunca yapışma bölgelerinde daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu bölgelerden uzaklaştıkça stresler azalır.



**Şekil 19.** 0.7mm çekirdek et kalınlığı, s-şekilli 50mm hücre yüksekliğinde, R7.5mm eğrilik yarıçaplı sandviç kompozitin farklı çizgiler üzerindeki  $\tau_{xz}$  gerilme eğrileri; a) A-B ve C-D çizgileri boyunca, b) E-F çizgisi boyunca AB, C-D ve E-F hatları boyunca ( $\tau_{xz}$  stress curves on different lines of 0.7mm core wall thickness, s-shaped 50mm cell height, R7.5mm radius of curvature sandwich composite; a) Along A-B and C-D lines, b) Along E-F line Along AB, C-D and E-F lines)

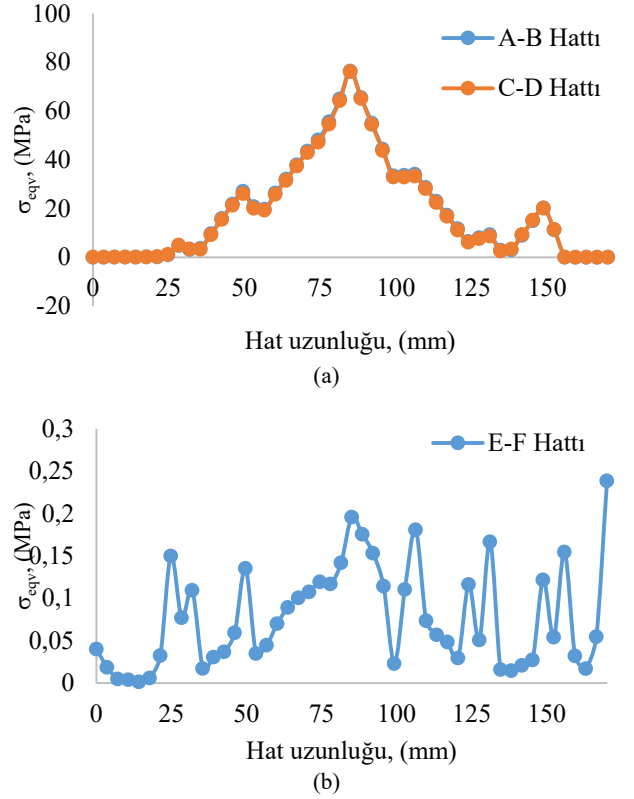
0,7 mm çekirdek et kalınlığına, R7.5 mm eğrilik yarıçapına ve S-şekilli 50 mm hücre yüksekliğine sahip sandviç kompozitin AB, C-D ve E-F çizgileri boyunca von-Mises eşdeğer geriliminin dağılımı sırasıyla Şekil 20'de verilmiştir. Ardışık gerilme dağılımları incelendiğinde hem A-B hem de C-D hatlarının gerilmeleri uçlarda sıfırdır, ortaya doğru artmaya başlar ve maksimum ortadadır. Bu, üç noktalı eğilme testlerinde beklenen bir sonuçtur çünkü eğilme momentleri uçlarda sıfır ve merkezde maksimumdur.

### 3.1. Literatürdeki diğer yapılar ile karşılaştırılması (Comparison with other structures in the literature)

Şekil 21, diğer araştırmacıların [23] çalışmalarından elde edilen rakip çekirdek yapıları, bu yayında oluşturulan S çekirdekli sandviç panellerin eğilme modülü ve mukavemeti ile karşılaştırmaktadır. Çekirdek yapıların üç noktalı eğilme yükünün eğilme modülü Eş. 1 ve eğilme mukavemeti Eş. 2'deki formüller ile elde edilir:

$$E_B = \frac{Lb^3 P}{4cH^3 \delta} \quad (1)$$

$$\sigma_B = \frac{3PmL_B}{2cH^2} \quad (2)$$

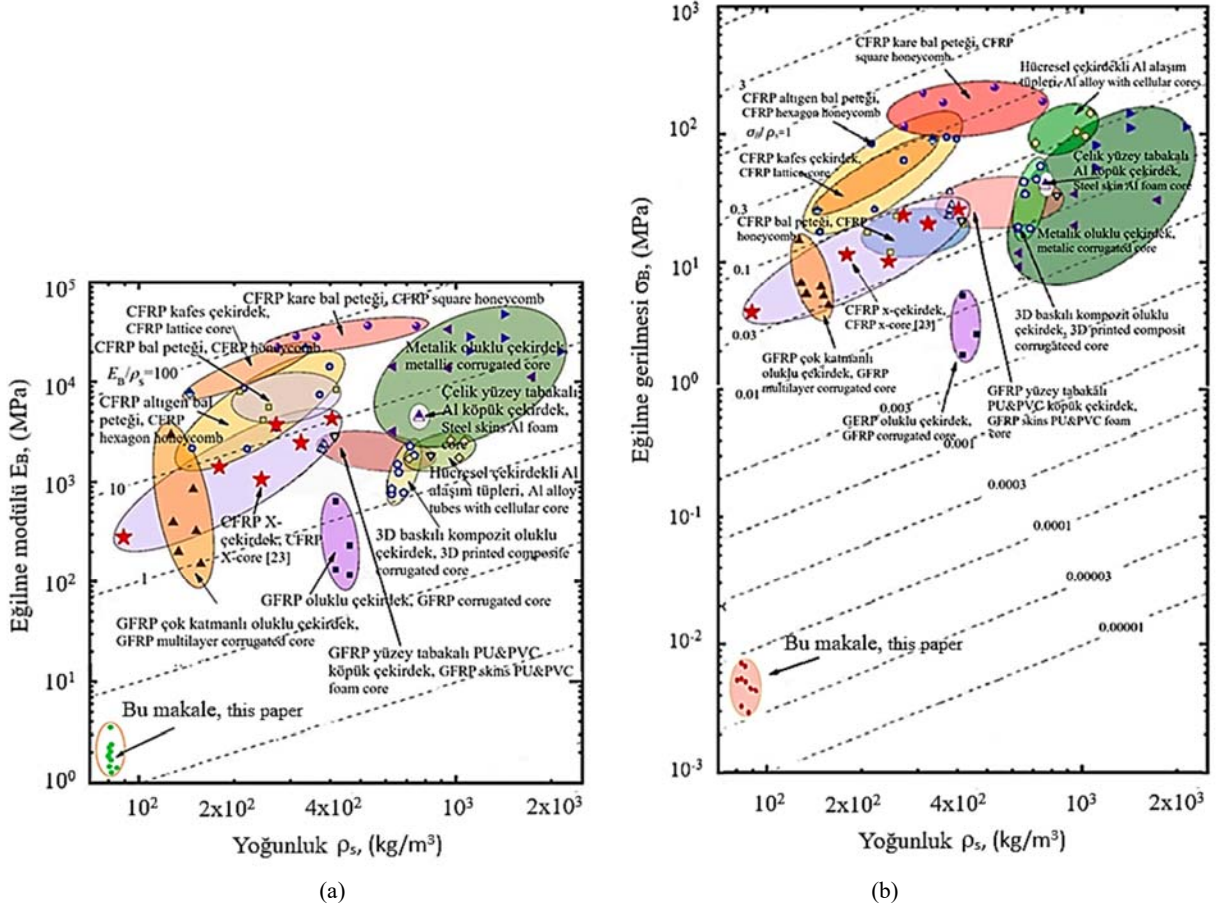


**Şekil 20.** Farklı hatlarda 0.7mm çekirdek et kalınlığı, R7.5mm eğrilik yarıçapı ve s-şekilli 50mm hücre yüksekliğinde sandviç kompozitin  $\sigma_{eqv}$  gerilme eğrileri; a) A-B ve C-D çizgileri boyunca, b) E-F çizgisi boyunca  
(Stress curves  $\sigma_{eqv}$  of sandwich composite with 0.7mm core wall thickness, R7.5mm radius of curvature and s-shaped 50mm cell height in different lines; a) Along A-B and C-D lines, b) Along E-F line)

Çeşitli yoğunluklar için malzeme seçim haritaları Şekil 21'de gösterilmektedir. Bu araştırma, köpük, GFRP ve CFRP-X çekirdeklerin yanı sıra oluklu metalik ve GFRP çekirdeklere sahip sandviç yapıların spesifik eğilme mukavemetini ve spesifik eğilme modülünü değerlendirir. S çekirdekli sandviç yapılarıyla oluşturulan test numunelerinde boşluklu hacimler %89,75 ila %93,27 arasında olup karşılaştırmada kullanılan kompozit yapılardan en düşük yoğunluğa ulaşıldı (16.8kg/m<sup>3</sup>) ve en hafif malzeme yapısı olduğu tespit edildi. Genel olarak hafif grup uygulamaları S-çekirdekli sandviç kompozit paneller ile karşılanabilir.

### 4. Simgeler (Symbols)

$E_B$	: Eşdeğer eğilme modülü
$L_b$	: Destek aralığı
$P$	: Eğilme yükü
$H$	: Sandviç panel yüksekliği
$c$	: Sandviç panelin genişliği
$\rho_s$	: Sandviç panelin yoğunluğu
$\sigma_{eqv}$	: Eşdeğer gerilme
$\sigma_B$	: Eşdeğer eğilme gerilmesi
$\delta$	: Çökme (sehim) miktarı
$m$	: Numunenin kütlesi
$t$	: Çekirdek et kalınlığı
$R$	: Çekirdek eğrilik yarıçapı



Şekil 21. (a) Eğilme modülü  $E_B$ 'ye karşı yoğunluk  $\rho_s$  ve (b) S çekirdekli sandviç yapıların rakip yapılarla karşılaştırıldığında eğilme mukavemeti  $\sigma_B$ 'ye karşı yoğunluk  $\rho_s$  [23]

((a) Flexural modulus  $E_B$  vs. density  $\rho_s$  and (b) S-core sandwich structures flexural strength  $\sigma_B$  vs. density  $\rho_s$  compared to competing structures)

## 5. Sonuçlar (Conclusions)

Üç nokta eğilme testine tabi tutulan farklı çekirdek yarıçaplarına ve et kalınlıklarına sahip S şekilli 50 mm hücre yüksekliğindeki sandviç kompozitin sayısal gerilme analizi ve test bulguları incelendiğinde aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- Hasar yükleri incelendiğinde, çekirdek kalınlıkları arttıkça hasar yüklerinin ve eğilme rijitliklerinin arttığı, bu da plakaların sehimini kademeli olarak azalttığı görülmektedir. Bunun nedeni, çekirdek malzemelerin kalınlığı arttıkça, eğilmeye karşı direncin atalet momenti arttıkça daha az eğilme ve sehim yapmasına neden olmasıdır.
- S şeklindeki çekirdek malzemenin eğrilik yarıçapı arttıkça hasar yükleri azalır.  $1/\rho = M/EI$  ifadesinde, eğrilik yarıçapı arttıkça  $M/EI$  ifadesi azalır; yani, daha düşük eğilme momenti ve daha düşük hasar yükü ile hasar deformasyonlarına ve hasar gerilmelerine ulaşılır.
- Analiz sonucunda yapıştırıcı üzerindeki gerilemeler hasara neden olmaz. Bu durum yapılan deneysel çalışmalarla desteklenmiş hasar oluşumu yapıştırıcı üzerinde olmadığı gözlemlenmiştir. yapıştırıcı üzerinde düşük gerilmelerin oluşması yapıştırıcı seçimi için daha geniş bir spektrum sağlar.
- Sehim eğrileri, S-çekirdek yönleri doğrultusunda ilgili hattın sonunda pozitif yer değiştirme oluşturdu. Çökme eğrisinin incelenen hat boyunca eşdeğer bir biçimde olması için, çekirdekler aynı ve zıt yönlerde eşit sayıda dizilimle düzenlenebilir.

Yeni bir çekirdek formu olarak tasarlanan ve analiz edilen S şeklindeki çekirdek yapısı, farklı malzeme seçimleri, dolgu maddeleri ve bağlayıcı elemanların kullanımı ile literatüre katkı sağlayacaktır. İlerleyen çalışmalarda bahsedilen yeni formların incelenmesi amaçlanmaktadır.

## Teşekkür (Acknowledgement)

Bu araştırma İnönü Üniversitesi tarafından desteklenmiştir (BAP Proje Kodu: FDK-2020-2306). Yazarlar, projeyi finanse ettiği için İnönü Üniversitesi'ne teşekkür ederler.

## Kaynaklar (References)

1. Arslan M., Güler O., Alver U., The investigation of the mechanical properties of sandwich panel composites with different surface and core materials. Pamukkale University Journal of Engineering Sciences, 24 (6),1062-1068, 2018.
2. Chen S., Tan X., Hu J., Zhu S., Wang B., Wang L., Jin Y., Wu L., A novel gradient negative stiffness honeycomb for recoverable energy absorption, Composites Part B: Engineering, 2, 108745, 2021.
3. Cao J., Cai K., Wang Q., Shi J., Damage behavior of a bonded sandwich beam with corrugated core under 3-point bending, Material Design Volume, 95, 165-172, 2016.
4. Zhang Y., Liu T., Tizani W., Experimental and numerical analysis of dynamic compressive response of Nomex honeycombs, Composite Part B: Engineering, 148, 27-39, 2018.

5. Wu X., Yu H., Guo L., Zhang L., Sun X., Chai Z., Experimental and numerical investigation of static and fatigue behaviors of composites honeycomb sandwich structure, *Composite Structure*, 165-172, 2019.
6. Xu G., Yang F., Zeng T., Cheng S., Wang Z., Bending behavior of graded corrugated truss core composite sandwich beams, *Composite Structure*, 342-251, 2016.
7. Li T., Wang L., Bending behavior of sandwich composite structures with tunable 3D-printed core materials, *Composite Structure*, 46-57, 2017.
8. Potes F.C., Silva J.M., Gamboa P.V., Development and characterization of a natural lightweight composite solution for aircraft structural applications, *Composite Structures*, 430-440, 2016.
9. Forsberg J., Nilsson L., Evaluation of response surface methodologies used in crashworthiness optimization, *International Journal of Impact Engineering*, 759-777, 2006.
10. Qi G., Chen Y., Richert P., Ma L., Schröder K., A hybrid joining insert for sandwich panels with pyramidal lattice truss cores, *Composite Structures*, 241, 112-123, 2020.
11. Lu X., Tan V.B.C., Tay T.E. Auxeticity of monoclinic tetrachiral honeycombs, *Composite Structures*, 241, 112067, 2020.
12. Naresh K., Cantwell W.J., Khan K.A., Umer R., Single and multi-layer core designs for Pseudo-Ductile failure in honeycomb sandwich structures, *Composite Structures*, 256, 113059, 2021.
13. Newstead S., Watson L., Cameron M., Vehicle Safety Ratings Estimated From Police Reported Crash Data: 2008 Update, Monash University Accident Research Center Report, Melbourne, Australia, 280, 2008.
14. Xiang X.M., Lu G., Wang Z.H., Quasi-static bending behavior of sandwich beams with thin-walled tubes as core, *Int J Mech Sci*, 55-62, 2015.
15. Petras A., Sutcliffe M.P.F., Failure mode maps for honeycomb sandwich panels, *Composite Structure*, 237-252, 1999.
16. Sun Z., Shi S., Hu X., Guo X., Chen J., Chen H., Short-aramid-fiber toughening of epoxy adhesive joint between carbon fiber composites and metal sub-strates with different surface morphology, *Composite Part B Engineering*, 38-45, 2015.
17. Pan S. D., Wu L. Z., Sun Y.G., Zhaou Z.G., Fracture test for double cantilever beam of honeycomb sandwich panels, *Materials Letters*, 62, 523-526, 2008.
18. Qin Q., Chen S., Li K., Jiang M., Cui T., Zhang J., Structural impact damage of metal honeycomb sandwich plates, composite, Volume 252, 112719, 2020.
19. Qin Q. H., Wang T. J., Low-velocity impact response of fully clamped metal foam core sandwich beam incorporating local denting effect, *Composite Structures*, 96, 346-356, 2013.
20. Zhang X., Xu F., Zang Y., Feng W., Experimental and numerical investigation on damage behavior of honeycomb sandwich panel subjected to low-velocity impact composite, 236, 111882, 2020.
21. [21] Kaveloğlu S., Temiz Ş., Investigation of low-velocity impact performances of sandwich composites manufactured using 3d printer, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University* 39 (1), 139-150, 2024.
22. Xiong J., Ma L., Wu L., Wang, B., & Vaziri, A Fabrication and crushing behavior of low-density carbon fiber composite pyramidal truss structures, *Composite Structures*, 92, 2695-2702, 2010.
23. Wang H.P., Wu C.T., Guo Y., Mark E, Botkin A., Coupled meshfree/finite element method for automotive crashworthiness simulations, *International Journal of Impact Engineering*, 36 (10-11), 1210-1222, 2009.
24. Mei J., Liu J., Huang W., Three-point bending behaviors of the foam-filled CFRP X-core sandwich panel: Experimental investigation and analytical modeling, *Composite Structures*, 284, 11520, 2022.
25. Sokolinsky V.S., Shen H., Vaikhanski L. and Nutt SR., Experimental and analytical study of nonlinear bending response of sandwich beams, *Composite Structures*, 60, 219-229, 2003.
26. Çakan B., Ensarioğlu C., Küçükakarsu V., Tekin İ., Çakır M., Experimental and numerical investigation of in-plane and out-of-plane impact behavior of auxetic honeycomb boxes produced by material extrusion, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University* 36 (3), 1657-1667, 2021.
27. Aluminum 1050-O. <https://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=273c1ffbc134a8292c704da3ee2ff35>. Erişim Tarihi Eylül 18, 2022.
28. Stainless steel-Grade316. <https://www.azom.com/properties.aspx?ArticleID=863>. Erişim Tarihi Eylül 18, 2022.
29. Stainless steel 316. <https://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=3a413dabd215462da3408e6e8b761349>. Erişim tarihi Eylül 18, 2022.
30. Öztemiz H.M., Temiz Ş., Mechanical Behaviors Of Different Radii Of Curvature S-Shaped Core Sandwich Composites Subjected To Bending Load, *International Asian Congress On Contemporary Sciences-VI, Van-Türkiye*, 200-207, 27-29 May 2022.
31. Öztemiz H.M., Temiz Ş., Mechanical Behaviors Of Different Array With S-Shaped Core Sandwich Composites Subjected To Bending Load, *International Asian Congress On Contemporary Sciences-VI, Van-Türkiye*, 208-216, 27-29 May 2022.

