



## SANDVIÇ KOMPOZİTLERDE ÇEKİRDEK KALINLIĞININ VE KARBON LİF YÖNLENMELERİNİN BASMA VE EĞİLME DAYANIMLARINA ETKİSİ

<sup>1</sup>Serhat Osmanoğlu, <sup>2</sup>Erdem Selver, <sup>3</sup>Muharrem İmal

<sup>1</sup>Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Otomotiv Mühendisliği Bölümü,  
Bursa, TÜRKİYE

<sup>2</sup>Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Tekstil Mühendisliği Bölümü,  
Kahramanmaraş, TÜRKİYE

<sup>1,3</sup>Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü,  
Kahramanmaraş, TÜRKİYE

<sup>1</sup>serhatosmanoglu@uludag.edu.tr, <sup>2</sup>eselver@ksu.edu.tr, <sup>3</sup>muharremimal@ksu.edu.tr

(Geliş/Received: 30.12.2018; Kabul/Accepted in Revised Form: 05.09.2019)

**ÖZ:** Sandviç kompozit malzemelerin yüksek mukavemet ve rijitlik istenen, aynı zamanda ağırlığın problem olduğu havacılık endüstrisi, denizcilik endüstrisi, uzay ve mimari yapılar gibi alanlarda kullanımı yaygınlaşmıştır. Kompozit malzemelerde kullanılan yüzey plakaları, çekirdek malzemenin cinsi, yoğunluğu, boyutları malzemenin mekanik özelliklerini doğrudan etkilemektedir. Bu çalışmada kompozit sandviç panel malzemesinde çekirdek malzeme olarak farklı kalınlıkta PVC (PoliVinil Klorür) köpük kullanılmıştır. Vakum infüzyon yöntemiyle üretilen PVC köpüklü sandviç panellerin yüzey plakalarında tek yönlü ve çift eksenli karbon fiber kumaşlar kullanılmış, farklı fiber yönlenmelerine sahip panellere eğme ve basma deneyleri uygulanarak yüzey dayanımları karşılaştırılmıştır. Ayrıca, PVC köpükten farklı kalınlıkta çekirdek malzemeler kullanılarak çekirdek kalınlığının çekirdek kayma gerilmesi ve eğilme dayanımı üzerine etkisi araştırılmıştır. Sonuç olarak, panel plakalarında fiber yönlerinin yüzey mukavemetini etkileyen önemli bir parametre olduğu gözlemlenmiştir. PVC çekirdekli sandviç panellerde çekirdek kalınlığının artması sonucu basma ve eğilme dayanımının azaldığı ortaya çıkmıştır.

**Anahtar kelimeler:** Sandviç kompozitler, PVC köpük, Karbon lifi, Mekanik özellikler.

### The Effect of Carbon Fibre Orientations and Core Thicknesses on Compression and Flexural Properties of Sandwich Composites

**ABSTRACT:** Sandwich composite structures are commonly used in different areas such as aerospace, marine, space, architectural structures where high strength and stiffness are required as well as the weight is a critical problem. Mechanical properties of the sandwich panels were affected by facesheets type, facesheet density and dimensions of the core materials. In this study, different thicknesses of PVC (polyvinyl chloride) foams were used as corepart of sandwich panels. PVC foam cores and sandwich composites with unidirectional and biaxial carbon fiber fabric face sheets were produced using vacuum infusion method and strength of the panels which have different fiber orientations were compared with 3-point bending and compression tests. Also, the effect of core thickness on core shear stress and flexural strength was investigated by using core materials of different thickness PVC foam. As a result, directions of fiber in facesheets was observed to be an important parameter in face strength. It was obtained that increasing the thickness of the core in the sandwich panels decreased the flexural and compressive strength of sandwich composites.

**Keyword:** Sandwich composites, PVC foam, Carbon fibre, Mechanical properties.

## GİRİŞ (INTRODUCTION)

Havacılık, otomotiv ve inşaat mühendisliği uygulamalarında sandviç kompozit yapıların hafif ve yüksek mukavemetleri nedeniyle kullanımı giderek artmaktadır (Hwang, 2016; Jin ve diğ., 2013; Kim ve diğ., 2016; Ning ve diğ., 2015; Park ve Seo 2012; Xu ve diğ., 2016; Wang ve diğ., 2016). Sandviç panelin ana bileşenleri; fiber, matris ve çekirdek (core) malzemeden oluşmaktadır. Panel tasarımı yapılırken karar verilmesi gereken bir sandviç yapının ana özellikleri arasında bulunan fiber malzeme, matris malzemesi ve liflerin yönelimi (oryantasyonu) ve çekirdek özellikleri bulunur (Chowdhury ve diğ., 2016; Dawood ve diğ., 2015; Lu ve Youngblood 2015; Yamamoto ve diğ., 2016). Sandviçin yüzey laminant malzeme seçiminde, ağırlık oranına göre yapılan kıyaslamalar incelendiğinde KFTP'nin (karbon fiber takviyeli plastik) tercih edildiği görülmektedir (Dhieb ve diğ., 2016; Luo ve diğ., 2017).

Literatürde birçok araştırmacı, fiber takviyeli kompozit malzemeler kullanarak sandviç panellerin tasarımı ve üretimini kapsayan çeşitli sayısal ve deneysel çalışmalar yürütmüştür. Bir çalışmada karbon lifli tabakalar ile alüminyum petek çekirdeği arasında kırılmış Kevlar kullanılarak fiber ara yüzey sertliğinin etkinliği incelenmiş, reçine ve Kevlar liflerinden oluşan yapının, bir kompozit haline geldiği gözlemlenmiştir (Shi ve diğ., 2014). Alüminyum köpük çekirdekli sandviç kompozitin çarpma/darbe özelliğinin değişimi deney ve simülasyon analizi ile incelenmiştir (Han ve Cho., 2014). Delikli düz bir yapıya sahip sandviç kompozit malzemelerin eğme, basma ve darbe deneyleri ile performansları karşılaştırılmış ve ana katkı maddesi köpük olan sandviç kompozitleri, daha basit bir malzeme ile takviye ederek mekanik performansının iyileştirilmesi amaçlanmıştır (Yalkın ve diğ., 2015). Grafit köpük dolgulu sandviç kompozit ile alüminyum ve karbon fiber yüzeyli ve de bal peteği çekirdek malzemesi kullanılarak üretilen sandviç kompozitin dayanımı mekanik testlerle karşılaştırılmıştır (Quintana ve Maver, 2017). Alüminyum petek sandviç kompozitlerin kırılma davranışlarını araştırmak için, üç nokta eğme ve panel içi sıkıştırma testleri yapılmış, sandviç panellerin eğme testinden büyük ölçüde etkilendiği gözlemlenmiştir (Sun ve Li, 2017). Yapıştırıcı bağlayıcılar kullanarak alüminyum yüzeyli levhalar ile güçlendirilmiş ve EPS (genleşmiş polistren köpük) çekirdekli sandviç kirişlerin düşük hızda darbe ve eğilme davranışı araştırılmıştır (Caliskan ve Apalak, 2017). Çeşitli eğilme davranışları sergileyen yeni bir sandviç kompozitin tasarım ve üretimi için 3B üretim tekniği, sayısal analiz ve deneyler birlikte kullanılmıştır (Wang ve diğ., 2018). Yeni bir oluklu sandviç yapısı tasarlanarak üretilen sandviç kompozitlerin mekanik davranışları ve bozulma mekanizması incelenmiş; mukavemet, sertlik ve basınç bozulma altında hasar tespiti için analitik modeller geliştirilmiştir (Xu ve diğ., 2018). Sandviç kompozit içerisine yerleştirilen z-pimleri için en uygun boyut ve hacimsel oran, basma testleri yapılarak belirlenmiş ve z-pimli sandviç kompozitlerin basma özelliklerini tahmin edebilmek için bir model sunulmuştur (Mouritz, 2006). PVC köpük dolgusu içine üçgen formunda prizmatik oluklu bir yapı oluşturmak için 3B dokunmuş cam elyafı ekleyerek takviye sağlanan sandviç panellerde, yarı-statik basma gerilme gerinim tepkisi deneysel olarak araştırıldı ve mikromekanik hesaplamalarla karşılaştırıldı (Malcom ve diğ., 2013). Yüzey plakası olarak kırılmış cam elyafı/polyester laminant ve dolgu malzemesi olarak poliüretan köpük kullanılarak üretilen sandviç panellerin içerisine yerleştirilen polyester pimlerin etkisi, farklı yükleme oranlarında uygulanan eğme ve basma testleriyle araştırılmıştır (Abdi ve diğ., 2014). Farklı kalınlıkta PVC köpük malzeme ve yüzeyde örgü dizimli karbon elyaf kumaşlar kullanılarak çekirdek kalınlığının eğilme direnci üzerine etkisi deneysel olarak araştırılmıştır (Geren ve diğ. 2017). Farklı bir çalışmada ise, köpük dolgulu bal peteği sandviç panellerde dolgu içine yerleştirilen farklı çaplardaki polyester pimlerin etkisi, basma ve düşük hızlı darbe testleri ile incelenmiştir (Jayaram ve diğ., 2018). Karbon ve cam epoksi yüzey plakalarına sahip (Ekstrüde Polistren) XPS çekirdekli sandviç kompozit panellere yerleştirilen karbon/cam çubukların eğilme mukavemetine katkısı araştırılmıştır (Selver ve Kaya, 2019).

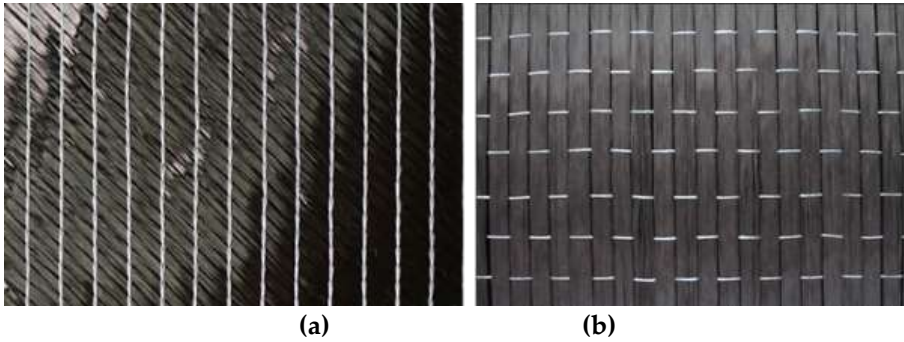
Genel olarak literatür incelendiğinde, çekirdek veya yüzey malzemesi değiştirilerek ya da özgün sandviç paneller tasarlanarak sandviç yapıların darbe direnci, eğilme ve basma dayanımı çeşitli deneysel ve sayısal çalışmalarla araştırılmıştır. Bu çalışmada ise, çekirdek yapısında farklı kalınlıkta PVC köpük kullanılarak ve yüzey plakalarında fiber yönlendirmeleri değiştirilerek üretilen kompozit sandviç panellerin

eğilme ve basma dayanımları karşılaştırılmıştır. Sandviç paneldeki çekirdek kalınlığının etkisi üç nokta eğilme ve basma testi ile karşılaştırılmıştır. Yüzey plakalarındaki fiber yönlendirmelerinin etkisi ise, eğilme testinden elde edilen veriler ile yüzey gerilmeleri ve çekirdek kayma gerilmeleri bulunarak incelenmiştir. Panellerin KFTP kompozit yüzey plakalarında açılal yönlendirmeleri elde etmek için tek yönlü ve çift eksenli karbon fiber kumaşlar takviye olarak kullanılmıştır. Kullanılan iki farklı takviye kumaşın deneysel çalışmalara etkisini yorumlayabilmek için yüzeydeki plakalardan çekme ve basma numuneleri üretilerek mekanik özellikleri tespit edilmiştir.

## MATERYAL VE METOT (MATERIAL and METHOD)

### Malzemeler (Materials)

Bu çalışmada KFTP, üretilecek sandviç paneller için yüzey plaka malzemesi olarak tercih edilmiştir. Farklı yönlendirmelerde 2 farklı tip karbon fiber kumaş, sandviç panellerin yüzey laminantında takviye malzemesi olarak kullanılmıştır. Kullanılan bu takviye kumaşlar, 300 g/m<sup>2</sup> tek yönlü (Unidirectional:UD) ve 300 g/m<sup>2</sup> çift eksenli (Biaxial:BA) karbon kumaşlardır (Şekil 1). Kumaşlar Dost Kimya'dan temin edilmiştir (Dost Kimya, 2018).



Şekil 1. Takviye karbon fiber kumaşlar, (a) BA (+45/-45) (b) UD

Figure 1. Carbon fiber fabrics (a) BA (+45/-45) (b) UD

KFTP matrisi için termoset grubuna giren BOND 300L-BOND300H epoksi reçine seti kullanılmıştır (Dost Kimya, 2018). Sandviç kompozit panelin çekirdeği için ise 10, 20 ve 30 mm kalınlığında 47 kg/m<sup>3</sup> yoğunlukta PVC köpük malzeme kullanılmıştır.

### Numunelerin hazırlanması (Sample preparation)

Çalışmada, 3 farklı kalınlıkta PVC köpük malzemesi çekirdek olarak kullanılmış ve 6 farklı yönlendirmede (Şekil 2) karbon fiber kumaşların serimi yapılmıştır. Bu farklı yönlendirmelerin ve çekirdek kalınlığının sandviç yapının mekanik özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Sandviç önyapılarda (preform), PVC çekirdeğin alt ve üst laminant kaplamalarında farklı yönlendirmelere göre serilen 300 g/m<sup>2</sup> tek yönlü (UD) ve 300 g/m<sup>2</sup> çift eksenli (BA) +45/-45 olmak üzere iki farklı karbon fiber kumaş takviye olarak kullanılmıştır (Şekil 2). Epoksi reçine ve sertleştiriciden oluşan matris malzeme, vakum infüzyon yöntemini kullanarak sandviç ön yapıların üzerine aktarılmıştır. Vakum infüzyon yöntemiyle kompozit yüzey plakalarının üretimi ve plakaların çekirdek malzemeye yapışması tek bir işlemde sağlanarak sandviç kompozit malzemeler üretilmiştir. Reçine aktarılan sandviç yapılar tekstil mühendisliği bölümü kompozit laboratuvarında bulunan vakum infüzyon masasında 80° C'de 2 saat kürleşmeye bırakılmıştır (Şekil 3). Reçine üretici firmanın tavsiyesiyle post-cure işlemi yapılmamıştır.

YÖNLENME 1 (Y1) [0/90/0] <sub>s</sub>			YÖNLENME 2 (Y2) [+45/90/-45] <sub>s</sub>			YÖNLENME 3 (Y3) [+45/-45/+45] <sub>s</sub>		
0	0	0	+45	+45	+45	+45	+45	+45
90	90	90	90	90	90	-45	-45	-45
0	0	0	-45	-45	-45	+45	+45	+45
10	20	30	10	20	30	10	20	30
mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
PVC	PVC	PVC	PVC	PVC	PVC	PVC	PVC	PVC
0	0	0	-45	-45	-45	+45	+45	+45
90	90	90	90	90	90	-45	-45	-45
0	0	0	+45	+45	+45	+45	+45	+45

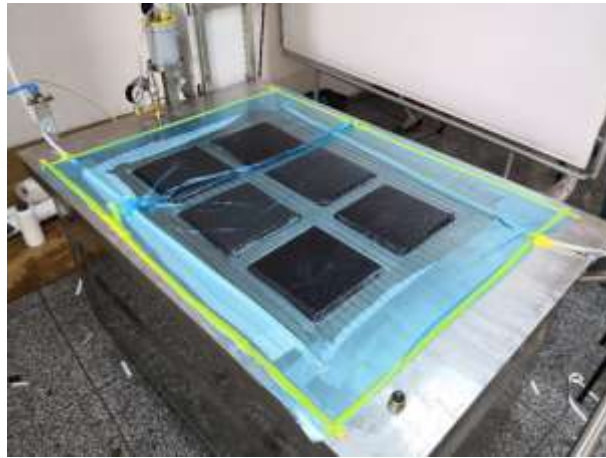
  

YÖNLENME 4 (Y4) [0/+45/90/-45] <sub>s</sub>			YÖNLENME 5 (Y5) [45/90/45/90] <sub>s</sub>			YÖNLENME 6 (Y6) [0/45/0/90] <sub>s</sub>		
0	0	0	+45	+45	+45	0	0	0
+45	+45	+45	90	90	90	+45	+45	+45
90	90	90	-45	-45	-45	0	0	0
-45	-45	-45	90	90	90	90	90	90
10	20	30	10	20	30	10	20	30
mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
PVC	PVC	PVC	PVC	core	PVC	PVC	PVC	PVC
-45	-45	-45	90	90	90	90	90	90
90	90	90	-45	-45	-45	0	0	0
+45	+45	+45	90	90	90	+45	+45	+45
0	0	0	+45	+45	+45	0	0	0

Şekil 2. Fiber yönlenmeleri

Figure 2. Fiber orientations

Sandviç panellerde kullanılan yüzey laminant kaplamaların (karbon/epoksi plakalar) mekanik özelliklerini tespit edebilmek için de ayrıca kompozit numuneler üretilmiştir. Laminantların çekme dayanımını belirlemek için tek yönlü (UD) ve çift eksenli (BA) takviye kumaşlardan 6'şar kat, kayma modülünü belirlemek için ise 8 kat takviye kumaş serilmiştir. Daha sonra serilen bu takviye kumaşlara vakum infüzyon masasında reçine emdirilerek sandviç yapı üretiminde olduğu gibi kürlenmeleri sağlanmıştır.



Şekil 3. Vakum infüzyon yöntemiyle sandviç kompozitlerin üretilmesi

Figure 3. Manufacturing of sandwich composites using vacuum infusion method

### Test metotları (Test methods)

Üretilen karbon/epoksi plakalardan ve köpükten alınan numunelerin yoğunluk deneyi ASTM D792-08 standardına göre yoğunluk ölçer kullanılarak yapılmıştır. KFTP kompozit laminantların 3 farklı ekseninde ( $E_1, E_2, G_{12}$ ) makro mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla çekme dayanımını belirlemek için ASTM D 3039'a göre (şekil 4), kayma dayanımlarını belirlemek için ise ASTM D 3518 'e göre testler yürütülmüştür. Ayrıca laminantların boyuna ve enine basma dayanımlarını belirlemek için ASTM D 7137 standartlarına göre üretilen özel test aparatı kullanılarak testler yürütülmüştür. Test numunelerinin ölçüm bölgesinden kırılması için cam epoksi laminantlardan bantlama uygulaması yapılmıştır. Numuneler standartlara uygun olarak 250 mm boyunda ve 25 mm eninde olacak şekilde hazırlanmıştır (Şekil 4).



Şekil 4. Çekme testi numunesi ve tek yönlü bir laminantın eksenleri

Figure 4. Tensile test specimen and axis of unidirectional laminates

Çekme testinde, lif (1) yönündeki ve life normal (2) yöndeki elastisite modülü ve çekme dayanımları ile kayma modülü ve kayma dayanımı belirlenmiş, Poisson oranları ise teorik olarak (mikro mekanik) hesaplanmıştır. Testler, Zwick marka test cihazında 3 mm/dk hızda gerçekleştirilirken  $E_1, E_2, G_{12}$  her bir sabit için 5'er adet olmak üzere toplamda 15 numune test edilmiştir. Yüzey laminant kaplamalarının Poisson oranları mikro mekanik teorik hesaplama metoduna göre (denklem 1) yapılmıştır.

$$v_{12}^c = v_m V_m + v_f V_f \quad (1)$$

Sandviç kompozitin yüzeyindeki karbon plakaların fiber hacim oranları aşağıdaki denklemle hesaplanmıştır;

$$V_f = \frac{\text{Fiber hacmi}}{\text{Kompozit hacmi}} = \frac{W_f/d_f}{L \times w \times h} = \frac{(n_{kat} \times g_r \times L \times w)/d_f}{L \times w \times h} = \frac{n_{kat} \times g_r}{h \times d_f} \quad (2)$$

Sandviç panellere ait eğme testi numuneleri ASTM C393'e göre uygun boyutlarda ve üç farklı kalınlıktaki altı ekseninde yönlenme için 3'er adet olmak üzere toplamda 54 eğme testi numunesi hazırlanmıştır (Şekil 5). Farklı kalınlıklarda kullanılacak olan PVC çekirdek malzemeleri 40 x 220 mm ebatlarında hazırlanmıştır. Mesnetler arası mesafe 120 mm iken mesnet silindir çapları 20 mm'dir. Eğme deneyinde 4 mm/dk hızında yürütülen deneylerde numunelerin eğilme dayanımları, çekirdek kayma gerilmeleri ve yüzey dayanımları denklem (3 ve 5) bağıntıları ile hesaplanmıştır.

$$\text{Eğilme Dayanımı (ASTM D790)} \quad \sigma_f = \frac{3PL}{bd^2} \quad (3)$$

$$\text{Çekirdek Kayma Gerilmesi (ASTM C393)} \quad F_s^{ult} = \frac{3P_{max}}{(d+c)b} \quad (4)$$

$$\text{Yüzey Gerilmesi (ASTM C393)} \quad \sigma = \frac{3P_{max}S}{2t(d+c)b} \quad (5)$$

Karbon/epoksi laminantlarla kaplanarak üretilen sandviç panellerin eğme deneyinde 10, 20 ve 30 mm PVC kalınlıklarına ve laminantlarının 6 farklı yönlenmesine göre eğilme dayanımları hesaplanmıştır.



Şekil 5. Sandviç kompozitlerin eğme deneyi

Figure 5. Flexural test of PVC foams and sandwich composites

Basma deneyi için, PVC köpüklerden 10, 20, 30 mm kalınlıklarındaki çekirdek malzemeler kullanılarak üretilen sandviç panellerin ASTM C365 standartlarına uygun numuneleri üretilmiştir.

#### BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS and DISCUSSIONS)

Yoğunluk deneylerinde takviye kumaşlar farklı olsa da üretilen karbon-epoksi laminantların yoğunlukları UD için ortalama  $1.47 \text{ g/cm}^3$  ve BA için  $1.41 \text{ g/cm}^3$  bulunmuş ve birbirine yakın olduğu görülmüştür. Ayrıca PVC köpük malzemenin ortalama  $47 \text{ kg/m}^3$  yoğunluğa sahip olduğu tespit edilmiştir (Çizelge 1).

Çizelge 1. Yüzey malzemeleri ve çekirdek malzemenin yoğunluk deneyi sonuçları

Table 1. Density test results of face and core materials

Numuneler	UD kompozit	BA kompozit	PVC köpük
Yoğunluk ( $\text{g/cm}^3$ )	1.47 ( $\pm 0.020$ )	1.41 ( $\pm 0.021$ )	0.047 ( $\pm 0.001$ )
Kalınlık (mm)	1.95( $\pm 0.03$ )	2.14 ( $\pm 0.03$ )	10-20-30
Lif hacim oranı (%)	51.86	47.25	-

#### Yüzey kompozitlerin çekme ve basma test sonuçları (Tensile and compression test results of face materials)

Dış yüzeylerde kullanılan karbon epoksi laminantların kaplamaların mekanik özellikleri (Çizelge 2) irdelendiğinde UD takviye kumaş için fiber yönündeki dayanımın doğal olarak en yüksek sonucu verdiği, BA kumaş için ise simetrik yapıda dokumaya sahip olduğu için  $E_1$  ve  $E_2$  yönünde elastisite modüllerinin eşit olduğu görülmüştür. Enine ve boyuna basma dayanımları karşılaştırıldığında, UD kompozit plakanın fiber yönünde  $918 \text{ MPa}$  ile en yüksek dayanıma sahip olduğu BA kumaş takviyeli kompozit plakada ise  $90 \text{ MPa}$  ile enine ve boyuna basma dayanımlarının eşit olduğu görülmüştür.

Çizelge 2. Yüzey laminant kaplamaların mekanik özellikleri

Table 2. Mechanical properties of face laminates

Mekanik Özellikler	UD karbon kumaş	+45/-45 BA karbon kumaş
E <sub>1</sub> (GPa)	101 (±9)	24 (±2.20)
E <sub>2</sub> (GPa)	3.35 (±0.50)	24 (±2.20)
G <sub>12</sub> (GPa)	7.15 (±0.90)	85 (±6)
Boyuna Çekme Dayanımı (MPa)	1410 (±136)	102 (±8)
Enine Çekme Dayanımı (MPa)	15.15 (±1.30)	102 (±10)
Kayma Dayanımı (MPa)	89.12 (±10)	413 (±36)
Boyuna basma dayanımı (MPa)	918 (±45)	90 (±12)
Enine Basma Dayanımı (MPa)	80 (±12)	90 (±12)
Poisson Oranı	0.32	0.31

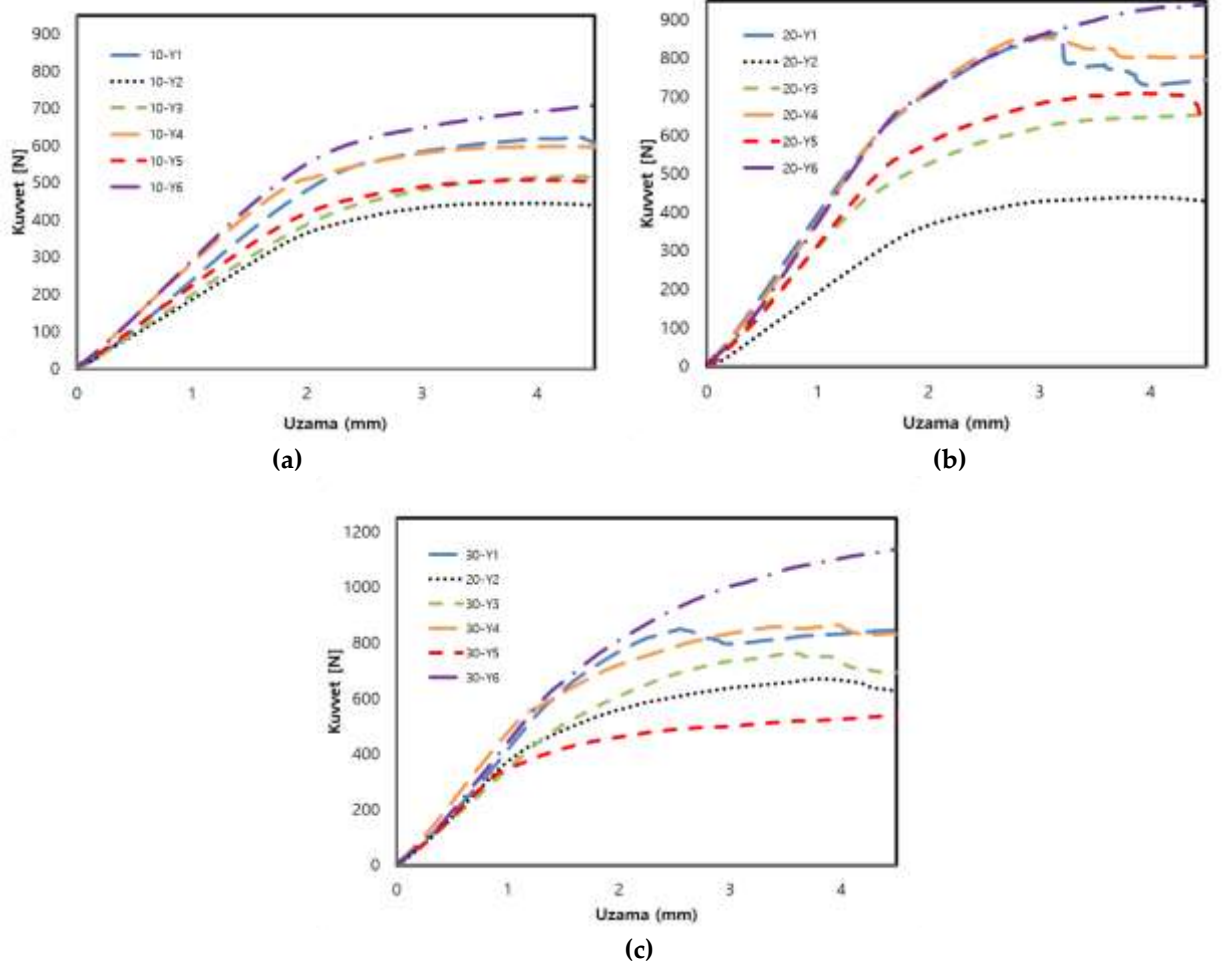
#### Sandviç kompozitlerin eğme testi sonuçları (Flexural test results of sandwich composites)

Üç nokta eğme deneyi sonrası numunelerde oluşan kalıcı bozulmalar Şekil 6'da verilmiştir. Farklı kalınlıkta PVC çekirdeklere sahip panellerin eğme deneyleri sonucunda elde edilen kuvvet-uzama grafikleri (Şekil 7 ve Çizelge 3) incelendiğinde kalınlık arttıkça maksimum kuvvetin arttığı ortaya çıkmıştır. 10 mm PVC panelde maksimum kuvvetin 726 N, 20 mm için 935 N, 30 mm için ise 1165 N olduğu görülmüştür.



Şekil 6. Eğme deneyi sonrası numunelerde oluşan hasarlar

Figure 6. Damages of specimens after flexural testing



**Şekil 7.** Farklı kalınlıktaki PVC çekirdeklere sahip sandviç panellerin 6 farklı yönlenmede kaplamalarına ait eğme testi sonucu oluşan kuvvet-uzama grafikleri: **(a)** 10 mm PVC çekirdekli paneller, **(b)** 20 mm PVC çekirdekli paneller, **(c)** 30 mm PVC çekirdekli paneller

*Figure 7.* Force-elongation graphics obtained by the flexural test of sandwich panels with different core thickness and 6 different orientations, **(a)** 10 mm PVC core panels, **(b)** 20 mm PVC core panels, **(c)** 30 mm PVC core panels

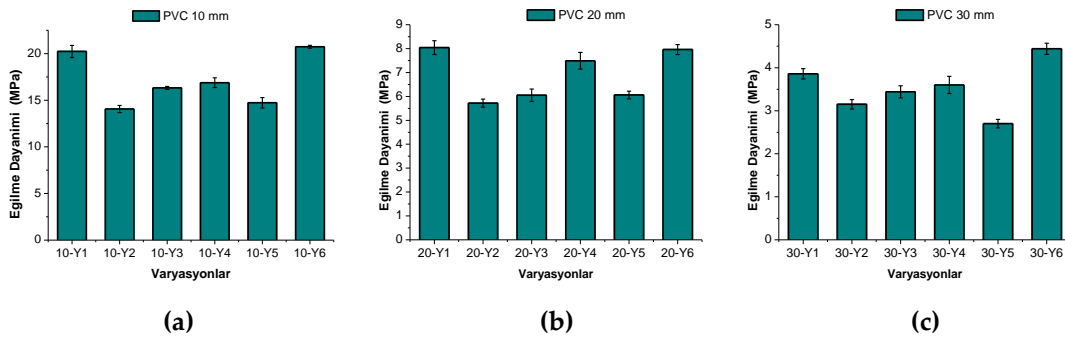


Çizelge 3. PVC sandviç kompozitlere ait eğme deneyi sonuçları

Table 3. Flexural test results of PVC sandwich composites

Sandviç Paneller	Maksimum Kuvvet (N)	Eğilme Dayanımı (MPa)	Çekirdek Kayma Gerilmesi (kPa)	Yüzey Gerilmesi (MPa)
10-Y1	623 (±16)	20.23 (±0.65)	680 (±14.12)	41.04 (±1.13)
10-Y2	439 (±9)	14.06 (±0.80)	480 (±8.10)	28.83 (±0.70)
10-Y3	512 (±15)	16.32 (±0.16)	560 (±15.87)	33.67 (±0.98)
10-Y4	587 (±14)	16.88 (±0.52)	620 (±9.52)	18.63 (±0.39)
10-Y5	511 (±12)	14.73 (±0.56)	550 (±10.65)	16.45 (±0.64)
10-Y6	726 (±23)	20.73 (±0.16)	780 (±14.91)	23.31 (±0.97)
20-Y1	867 (±20)	8.04 (±0.29)	500 (±9.36)	29.86 (±1.20)
20-Y2	668 (±25)	5.72 (±0.17)	370 (±12.10)	22.12 (±0.63)
20-Y3	671 (±18)	6.05 (±0.26)	390 (±16.54)	23.15 (±0.74)
20-Y4	846 (±9)	7.49 (±0.35)	500 (±22.37)	15.02 (±0.79)
20-Y5	705 (±24)	6.06 (±0.16)	410 (±20.89)	12.23 (±0.71)
20-Y6	935 (±21)	7.96 (±0.21)	530 (±13.18)	15.86 (±0.54)
30-Y1	914 (±17)	3.86 (±0.12)	350 (±9.25)	19.10 (±0.80)
30-Y2	748 (±32)	3.15 (±0.11)	290 (±9.65)	17.52 (±0.51)
30-Y3	835 (±20)	3.44 (±0.14)	320 (±10.83)	25.58 (±0.76)
30-Y4	886 (±31)	4.44 (±0.20)	340 (±15.08)	10.20 (±0.29)
30-Y5	789 (±15)	2.7 (±0.10)	250 (±7.51)	7.54 (±0.38)
30-Y6	1165 (±19)	3.60 (±0.13)	430 (±10.76)	10.36 (±0.64)

Farklı yönlenmelerine göre eğilme dayanımları (Şekil 8) incelendiğinde fiber yönleri 90°'den 0°'ye doğru yaklaştıkça eğilme dayanımlarının arttığı görülmüştür. Bunun nedeni, kompozit malzemelere yük uygulandığında, lif yönünde daha fazla yük taşınabilmesidir. Çizelge 2'den de görüldüğü gibi karbon plakaların E<sub>1</sub> değeri E<sub>2</sub> değerinden çok daha yüksek çıkmıştır. Bu bakımdan en yüksek dayanımların 3 katlı laminant yüzeylerde [0/90/0]<sub>s</sub> 1.yönlenme, 4 katlı laminant modellerde ise [0/45/0/90]<sub>s</sub> 6.yönlenmenin olduğu ortaya çıkmıştır.



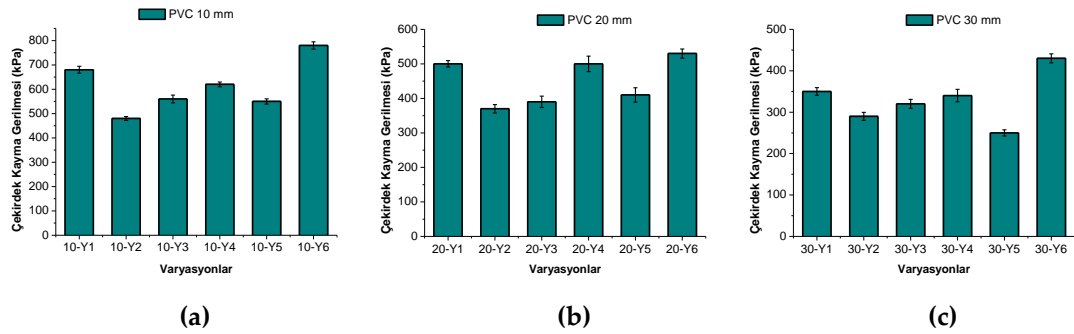
Şekil 8. Farklı kalınlıkta PVC çekirdeklere sahip sandviç panellerin 6 farklı yönlenmede kaplamalarına ait eğilme dayanımı sonuçları: (a) 10 mm PVC çekirdekli paneller, (b) 20 mm PVC çekirdekli paneller, (c) 30 mm PVC çekirdekli paneller

Figure 8. Flexural strength results of sandwich panels with different core thickness and 6 different orientations: (a) 10 mm PVC core panels, (b) 20 mm PVC core panels, (c) 30 mm PVC core panels

Çekirdek kayma gerilmesinde (Şekil 9) 10, 20 ve 30 mm PVC köpükler kıyaslandığında, kalınlık arttıkça çekirdek kayma dayanımının azaldığı görülmektedir. Bunun sebebi çekirdek kayma dayanımı hesaplanırken kalınlığın iki kat artarken kuvvetin aynı oranda artmamasından dolayı kalınlık ve dayanım ters orantılı olarak değişmektedir. Bu sonuç aynı zamanda alan atalet momenti ile de ilişkilendirilebilir.

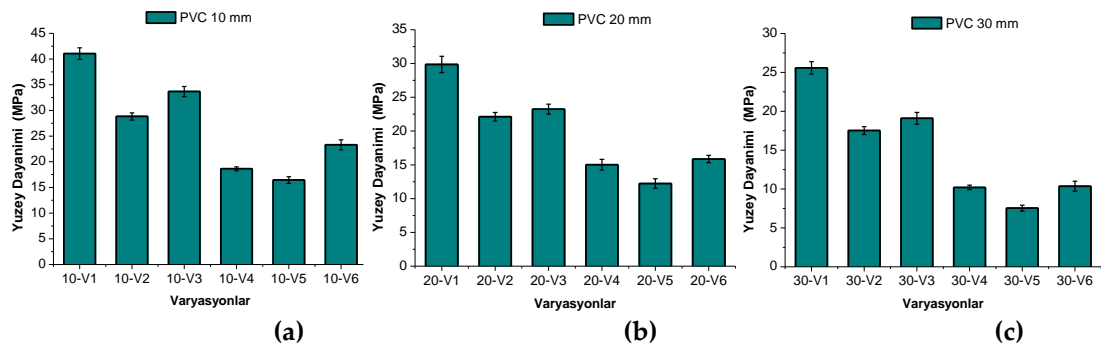
(Elemanter bir alana etkiyen elemanter bir kuvvet, mesafe ve diferansiyel alan ile orantılı olur). Yönlenme modellerine göre çekirdek kayma gerilmeleri incelendiğinde eğilme dayanımıyla benzer sonuçlar elde edilmiştir. 3 kat takviyeli laminantlardaki 1.yönlenme en yüksek, 4 katlı laminantlardan ise 6.yönlenmenin en yüksek değere sahip olduğu görülmüştür. 10 mm PVC köpük sandviçte en yüksek çekirdek kayma dayanımının 780 kPa (Y6), 20 mm PVC için 530 kPa (Y6), 30 mm için ise 430 kPa (Y6) değerleri ölçülmüştür (Çizelge 3).

Sandviç kompozit yapının üst ve alt plaka dayanımı sonuçları (Şekil 10) yönlenme tiplerine göre incelendiğinde, laminantlardaki  $0^\circ$  ve  $45^\circ$  yönelimlerini kıyaslamak için oluşturulan Y<sub>1</sub> ve Y<sub>2</sub> panellerinde, UD takviyeli laminanın E<sub>1</sub> (fiber yönü) modülünün BA +45/-45 takviyeli laminanın G<sub>12</sub> kayma modülünden yüksek olduğu (Çizelge 2), bu sebeple her iki modeldeki panellerin eğilme, çekirdek kayma ve yüzey dayanımları karşılaştırıldığında iki kat  $0^\circ$  yönünde UD laminaya sahip Y<sub>1</sub> modelinde daha yüksek çıktığı tespit edilmiştir.  $45^\circ$  ve  $90^\circ$ 'de serilen takviyeler Y<sub>2</sub> ve Y<sub>3</sub> yönlenmelerinden elde edilen dayanımlar karşılaştırıldığında  $45^\circ$  fiber yönündeki laminantların yüzey dayanımlarının  $90^\circ$ 'den üstün olduğu görülmektedir. Sonuçlar genel olarak değerlendirildiğinde fiber yönleri  $90^\circ$ 'den  $0^\circ$ 'ye yaklaştıkça sandviç kompozitin eğilme, yüzey ve çekirdek dayanımının arttığı görülmüştür. PVC çekirdek kalınlıklarının etkisine bakıldığında ise kalınlık arttıkça eğilme, çekirdek kayma ve yüzey dayanımlarının nicel olarak azaldığı fakat ölçülen maksimum kuvvetlerin arttığı tespit edilmiştir.



Şekil 9. Farklı kalınlıkta PVC çekirdeklere sahip sandviç panellerin 6 farklı yönlenmede kaplamalarına ait çekirdek kayma gerilmesi sonuçları: (a) 10 mm PVC çekirdekli paneller, (b) 20 mm PVC çekirdekli paneller, (c) 30 mm PVC çekirdekli paneller

Figure 9. Core shear stress results of sandwich panels with different core thickness and 6 different orientation: (a) 10 mm PVC core panels, (b) 20 mm PVC core panels, (c) 30 mm PVC core panels

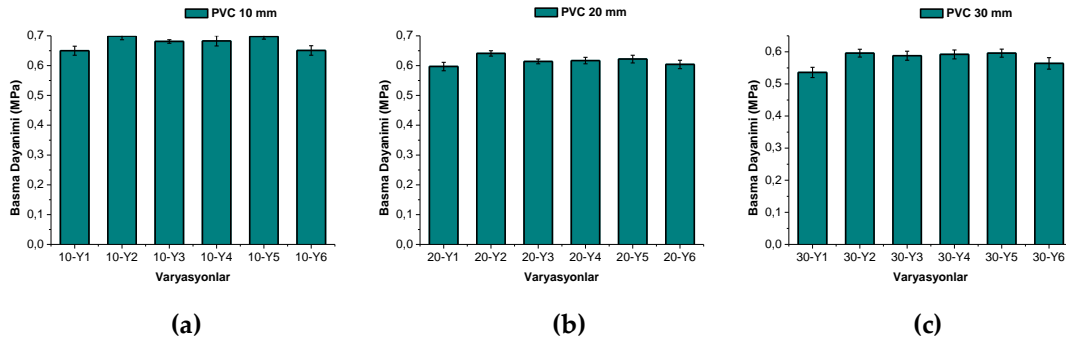


Şekil 10. Farklı kalınlıkta PVC çekirdeklere sahip sandviç panellerin 6 farklı yönlenmede kaplamalarına ait yüzey dayanımı sonuçları: (a) 10 mm PVC çekirdekli paneller, (b) 20 mm PVC çekirdekli paneller, (c) 30 mm PVC çekirdekli paneller

Figure 10. Face stress results of sandwich panels with different core thickness and 6 different orientation: (a) 10 mm PVC core panels, (b) 20 mm PVC core panels, (c) 30 mm PVC core panels

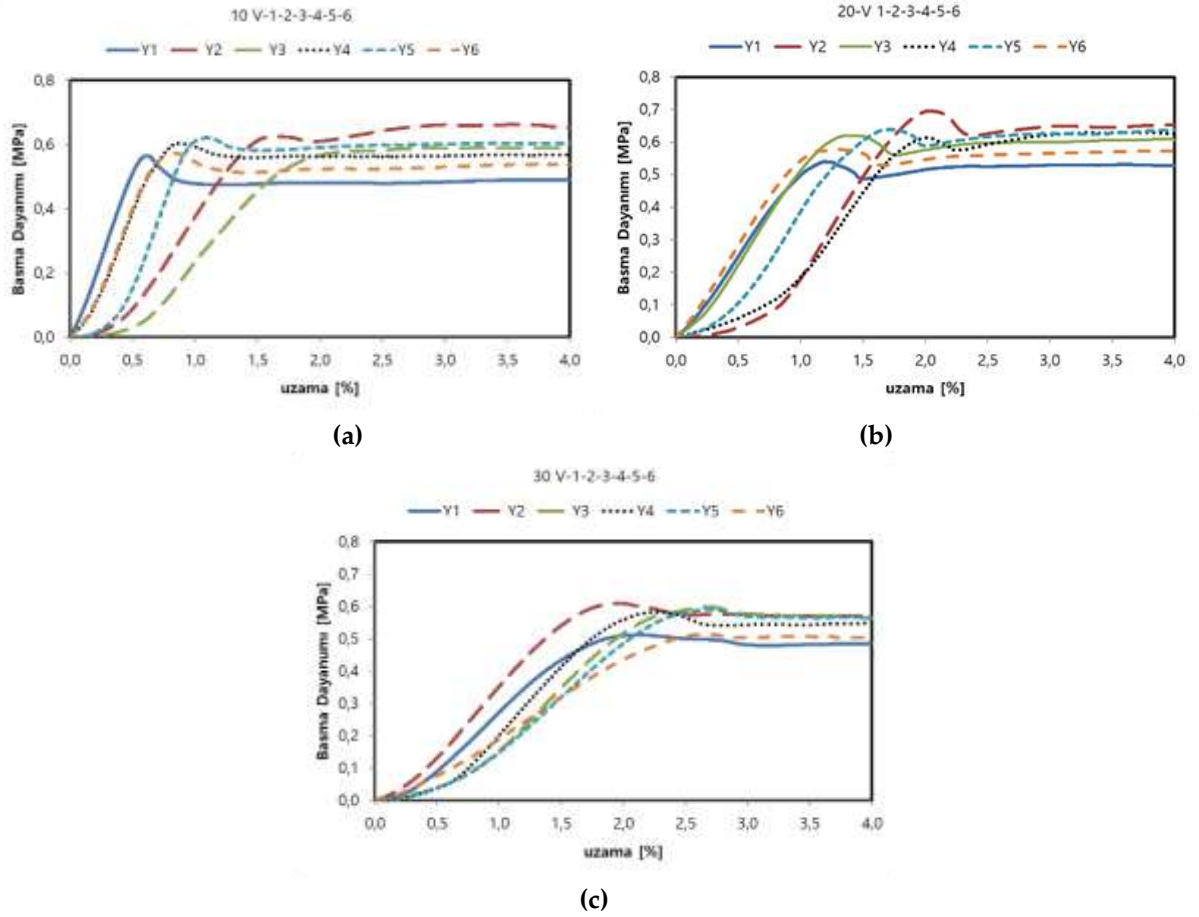
### Sandviç kompozitlerin basma dayanımı test sonuçları (Compression test results of sandwich composites)

PVC çekirdekli sandviç panellerde, fiber yönlenmelerinin basma dayanımı etkisi araştırıldığında yüzey plakalarının basma dayanımını çok fazla etkilemediği, fakat çekirdek kalınlığı arttıkça maksimum basma kuvvetinin azaldığı (Şekil 11 ve 12) tespit edilmiştir. Farklı yönlenmelerde yapılan basma deneylerinde görülen maksimum kuvvetler PVC 10 mm sandviç kompozit için maksimum kuvvet 1119 N-1040 N, 20 mm için 1025 N-955 N, 30 mm için 954 N-855 N aralıklarında değiştiği görülmüştür. Standartlara (ASTM C365) uygun olarak yapılan basma deneyinde PVC panellere ait maksimum basma kuvveti değerlerinin kalınlık artmasına bağlı olarak ortalama %9 oranında azaldığı görülmüştür (Çizelge 4).



**Şekil 11.** Farklı kalınlıkta PVC çekirdeklere sahip sandviç panellerin 6 farklı yönlenmede kaplamalarına ait basma dayanımı sonuçları: **(a)** 10 mm PVC çekirdekli paneller, **(b)** 20 mm PVC çekirdekli paneller, **(c)** 30 mm PVC çekirdekli paneller

*Figure 11. Results of compressive strength of sandwich panels with different core thickness and 6 different orientations: (a) 10 mm PVC core panels, (b) 20 mm PVC core panels, (c) 30 mm PVC core panels*



**Şekil 12.** Farklı kalınlıkta PVC çekirdeklere sahip sandviç panellerin 6 farklı yönlenmede kaplamalarına ait gerilim-uzama (%) uzama grafikleri: **(a)** 10 mm PVC çekirdekli paneller, **(b)** 20 mm PVC çekirdekli paneller, **(c)** 30 mm PVC çekirdekli paneller

*Figure 12.* Strength-elongation graphics of sandwich panels with different core thickness and 6 different orientation: **(a)** 10 mm PVC core panels, **(b)** 20 mm PVC core panels, **(c)** 30 mm PVC core panels

20 mm çekirdekli panelde 10 mm çekirdekli panele göre basma kuvvetinin ortalama %8 azaldığı, 30 mm çekirdekli panelde ise 20 mm çekirdekli panele oranla ortalama %10 azaldığı sonuçlarda görülmektedir. Bunun nedeni, çekirdek kalınlığı arttıkça PVC çekirdekte bulunan gaz molekül sayısı artmakta ve basma anında yüke karşı olan dayanım zayıflayarak malzeme daha kolay hasara uğramaktadır. Aynı kalınlıktaki tüm yönlenmelerde panellerin basma dayanımları sırası aynı eğilimi izlemiştir. 3 kat lamina kaplamaya sahip Y1,Y2,Y3 panellerinde basma dayanımı sırası  $Y2 > Y3 > Y1$  şeklinde meydana gelirken, 4 kat tabakaya sahip Y4,Y5,Y6 yönlenmelerinde ise basma dayanımı  $Y5 > Y4 > Y6$  olarak sonuçlanmıştır (Çizelge 4).

**Çizelge 4.** Sandviç kompozitlerin basma testi sonuçları*Table 4. Compression test results of sandwich composites*

Sandviç Paneller	Maksimum Kuvvet (N)	Basma Dayanımı (MPa)
10-Y1	1040 (±40)	0.650 (±0.015)
10-Y2	1119 (±13)	0.699 (±0.012)
10-Y3	1089 (±18)	0.681 (±0.006)
10-Y4	1093 (±36)	0.683 (±0.017)
10-Y5	1116 (±27)	0.698 (±0.009)
10-Y6	1042 (±65)	0.651 (±0.016)
20-Y1	955 (±37)	0.597 (±0.014)
20-Y2	1025 (±25)	0.641 (±0.009)
20-Y3	982 (±42)	0.614 (±0.008)
20-Y4	987 (±70)	0.617 (±0.011)
20-Y5	995 (±15)	0.622 (±0.013)
20-Y6	967 (±22)	0.604 (±0.014)
30-Y1	858 (±36)	0.536 (±0.016)
30-Y2	954 (±52)	0.596 (±0.012)
30-Y3	941 (±19)	0.588 (±0.014)
30-Y4	947 (±52)	0.592 (±0.014)
30-Y5	953 (±38)	0.596 (±0.012)
30-Y6	903 (±26)	0.564 (±0.018)

## SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, PVC köpük çekirdek malzemesi ve yüzey laminant kaplamalarında karbon elyaf takviye içeren sandviç kompozit paneller üretilmiştir. PVC çekirdek malzemelerin yüzeyleri 6 farklı yönlenmede karbon fiber kompozit plakalarla kaplanarak fiber yönlenmelerinin sandviç panelin yüzey gerilmesine etkisi araştırılmıştır. Aynı zamanda PVC köpükler aynı yoğunlukta seçilirken 10, 20 ve 30 mm farklı kalınlıklarda kesilerek sandviç paneldeki çekirdek kalınlığının eğilme dayanımı, çekirdek kayma gerilmesi ve basma dayanımlarına etkisi incelenmiştir. Ayrıca sandviç kompozit yüzeyindeki kompozit plakaların çekme ve basma deneyleri yürütülmüştür. Bu deneylerle kullanılan tek yönlü (UD) ve çift eksenli (BA) +45/-45 takviye karbon fiber kumaşlarla üretilen kompozit plakaların mekanik özellikleri elde edilmiştir. Genel olarak elde edilen sonuçlar ise;

- Sandviç panellerde üç nokta eğme testi sonucunda, eğilme dayanımı, basma dayanımı çekirdek kayma ve yüzey gerilmesinin kalınlık arttıkça azaldığı, fakat maksimum eğme kuvveti kalınlıkla doğru orantılı olarak ortalama %26 artmıştır.
- Yönlenmede ise fiber yönleri 90°'den 0°'ye yaklaştıkça plaka dayanımının arttığı görülmüştür.
- Panellerin basma dayanımlarının ve ölçülen maksimum basma kuvvetlerinin çekirdek kalınlığıyla doğru orantılı olarak azaldığı tespit edilmiştir.
- Sonuç olarak, panellerde çekirdek kalınlığının artmasıyla panelin daha fazla eğme kuvvetine karşı direnç gösterdiği fakat basma yüklerine maruz kalındığında ise çekirdek kalınlığının artmasıyla ters orantılı olarak basma mukavemetinin düştüğü tespit edilmiştir.

## TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENT)

Bu çalışma, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) birimi tarafından desteklenmiştir (Proje No:2017/2-36-YLS).

**SEMBOLLER (SYMBOLS)**

- $E_1$  : Boyuna elastisite modülü  
 $E_2$  : Enine elastisite modülü  
 $G_{12}$  : Kayma modülü  
 $\nu_{12}^c, \nu_m, \nu_f$ : Sırasıyla kompozit, matris ve fiber Poisson oranları  
 $V_m, V_f$ : matris ve fiber hacim oranları (%)  
 $W_f$ : Takviye fiberin ağırlığı  
 $d_f$ : Takviye fiberin yoğunluğu  
 $L, w, h$  : Sırasıyla numune uzunluğu, genişliği ve kalınlığı  
 $g_f$ : Takviye kumaşın birim alan yoğunluğu  
 $n_{layer}$ : Laminanttaki tabaka sayısı  
 $\sigma_f$ : Eğilme Dayanımı  
 $F_s^{ult}$ : Maksimum çekirdek kayma gerilmesi  
 $P, P_{max}$ : Kuvvet  
 $L, S$ : Yükleme uzunluğu  
 $b$ : Numune genişliği  
 $d$ : Numune Kalınlığı  
 $c$ : Çekirdek Kalınlığı  
 $t$ : Yüzey laminant kalınlığı

**KAYNAKLAR (REFERENCES)**

- Abdi, B., Azwan, S., Abdullah, M.R., Ayob, A., Yahya, Y., Xin, Li., 2014, "Flatwise compression and flexural behavior of foam core and polymer pin-reinforced foam core composites and sandwich panels", *Int. J. Mech. Sci.*, Cilt 88, ss. 138-144.
- Caliskan, U., Apalak, M.K., 2017, "Low velocity bending impact behavior of foam cores and sandwich beams: Experimental" *Compos Part B*, Cilt. 112, ss. 158-175.
- Chowdhury, N.M., Chiu, W.K., Wang, J., Chang, P., "Experimental and finite element studies of bolted, bonded and hybrid step lap joints of thick carbon fibre/epoxy panels used in aircraft structures", 2016, *Compos Part B*, Cilt 100, ss. 68-77.
- Dawood, M., El-Tahan, M.W., Zheng, B., 2015, "Bond behavior of super elastic shape memory alloys to carbon fiber reinforced polymer composites", *Compos Part B*, Cilt 77, ss. 238-247.
- Dhieb, H., Buijnsters, J.G., Elleuch, K., Celis, J.P., 2016, "Effect of relative humidity and full immersion in water on friction, wear and debonding of unidirectional carbon fiber reinforced epoxy under reciprocating sliding", *Compos Part B*, Cilt 8, ss. 240-252.
- Dost Kimya, Karbon fiber takviyeler ve epoksi reçineler, <http://kompozit.net>, ziyaret tarihi:15Kasım 2018.
- Geren, N., Uzay, Ç., Boztepe, M.H., Bayramoğlu, M., 2017 "Sandviç Malzeme Geliştirmede Polimer Köpük Kalınlığının Eğilme Dayanımına Etkisinin Deneysel Olarak Araştırılması", Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, Cilt 32(2), ss. 13-22.
- Han, M.S., Cho, J.U., 2014, "Impact damage behavior of sandwich composite with aluminum foam core", *Trans Nonferrous Met SocChina*, Cilt 24, ss. 42-46.
- Hwang, S., 2016, "Tensile, electrical conductivity and EMI shielding properties of solid and foamed PBT/carbon fiber composites", *Compos Part B*, Cilt 98, ss.1-8.
- Jayaram R.S., Nagarajan V.A., Vinod Kumar K.P., 2018, "Compression and low velocity impact response of sandwich panels with polyester pin-reinforced foam filled honeycomb core", *J. Sandwich Struct. Mater.*, Cilt 0(0), ss. 1-17.
- Jin. F.L., Lee S.Y., Park, S.J., 2013, "Polymer matrices for carbon fiber-reinforced polymer composites", *Carbohydr Lett*, Cilt 14, ss. 76-88.

- Kim, M., Sung, D.H., Kong, K., Kim, N., Kim, B.J., Park, H.W., et al., 2016, "Characterization of resistive heating and thermoelectric behavior of discontinuous carbon fiber-epoxy composites" *Compos Part B*, Cilt 90, ss. 37-44.
- Lu, J.H., Youngblood, J.P., 2015, "Adhesive bonding of carbon fiber reinforced composite using UV-curing epoxy resin", *Compos Part B*, Cilt 82, ss. 221-225.
- Luo, B., Yan, R., Zeng, H., Xu, L., 2017, "The mechanical behavior of sandwich composite joints for ship structures", *Ocean Engineering*, Cilt 144, ss. 78-89.
- Malcom A.J., Aronson M.T., Deshpande V.S., Wadley H.N.G., 2013, "Compressive response of glass fiber composite sandwich structures", *Compos Part A*, Cilt 54, ss. 88-97.
- Mouritz., A.P., 2006, "Compression properties of z-pinned sandwich composites", *J. Mater. Sci.*, Cilt 41, ss. 5771-5774
- Ning F., Cong, W., Qiu, J., We,i J., Wang, S., 2015, "Additive manufacturing of carbon fiber reinforced thermoplastic composites using fused deposition modeling", *ComposPart B*, Cilt 80, ss. 269-78.
- Park S.J, Seo M.K, 2012, "Carbon fiber-reinforced polymer composites: preparation, properties and applications", *Polymer composites*, Vol.1, Wiley-VCH VerlagGmbH&Co. KGaA., Weinheim, Germany.
- Quintana J.M., Maver T.M., 2017, "Thermomechanical behavior of sandwich panels with graphitic-foam cores" *Materials and Design*, Cilt 135, ss. 411-422.
- Selver, E., Kaya, G., 2019, "Flexural properties of sandwich composite laminates reinforced with glass and carbon Z-pins " *J Compos Mater*, Cilt 53 (10), ss. 1347-1359.
- Shi, S., Sun, Z., Hu, X., Chen, H., 2014, "Carbon-fiber and aluminum honeycomb sandwich composites with and without Kevlar-fiber interfacial toughening", *Compos Part A*, Cilt 67, ss. 102-110.
- Sun Y., Li Y., 2017, "Prediction and experiment on the compressive property of the sandwich structure with a chevron carbon-fibre-reinforced composite folded core", *Compos Sci Technol*, Cilt 150, ss. 95-101.
- Wang, F.S, Ji, Y.Y., Yu, X.S., Chen, H., Yue, Z.F., 2016, "Ablation damage assessment of aircraft carbon fiber/epoxy composite and its protection structures suffered from lightning strike", *Compos Struct*, Cilt 145, ss. 226-241.
- Wang, J., Shi, C., Yang, N., Liu, Y., Song, B., 2018, "Strength, stiffness, and panel peeling strength of carbon fiber-reinforced composites and sandwich structures with aluminum honeycomb cores for vehicle body", *Compos Struct*, Cilt 184, ss. 1189-1196.
- Xu, H., Zhang, X., Liu, D., Yan, C., Chen, X., Hui, D., 2016, "Cyclomatrix-type polyphosphazene coating: improving interfacial property of carbon fiber/epoxy composites and preserving fiber tensile strength" *Compos Part B*, Cilt 93, ss. 244-251.
- Xu, G., Wang,Z., Zeng, T., Cheng, S., Fang, D., 2018, "Mechanical response of carbon/epoxy composites and sandwich structures with three-dimensional corrugated cores", *Compos Sci Technol*, Cilt 156, ss. 296-304.
- Yalkin, H.E., Icten, B.M., Alpyildiz, T., 2015, "Enhanced mechanical performance of foam cores and sandwich composites with through the thickness reinforced core", *Compos Part B*, Cilt 79, ss. 383-391.
- Yamamoto, T., Uematsu, K., Irisawa, T., Tanabe, Y., 2016, "Controlling of the interfacial shear strength between thermoplastic resin and carbon fiber by adsorbing polymer particles on carbon fiber using electrophoresis", *Compos Part A*, Cilt 88, ss. 75-78.