

## Farklı yüzey ve çekirdek malzemelerine sahip sandviç panel kompozitlerin mekanik özelliklerinin incelenmesi

### The investigation of the mechanical properties of sandwich panel composites with different surface and core materials

Mustafa ASLAN<sup>1\*</sup>, Onur GÜLER<sup>2</sup>, Ümit ALVER<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup>Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, Türkiye.  
maslan@ktu.edu.tr, onurguler@ktu.edu.tr, ualver@ktu.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 07.10.2017, Kabul Tarihi/Accepted: 20.02.2018

\* Yazışılan yazar/Corresponding author

doi: 10.5505/pajes.2018.37605

Araştırma Makalesi/Research Article

#### Öz

Bu çalışmada, otomotiv sektöründe taşıyıcı elemanlardan olan şasi malzemesinin mukavemet değerlerini yükseltirken ağırlığını düşürmek amacıyla şasi malzemesi olarak sandviç panel teknolojisinin kullanılabilirliği araştırılmaya çalışılmıştır. Yüzey malzemeleri olarak; karbon elyaf ve cam elyaf takviyeli polyester kompozit ile alüminyum plaka kullanılırken, çekirdek malzemeleri olarak; alüminyum bal peteği, polipropilen (PP) bal peteği ve polietilen teraftalat (PET) sert köpük kullanılmıştır. Yüzey kompozit malzemeleri, cam ve karbon elyaf kumaşlarının katmanlı olarak polyester reçinesi ile ıslatılarak el yatırma ve basınçlı kalıplama metoduyla üretilmiştir. Sandviç plakaların soğuk preste 50 bar basınç altında 720 dk. boyunca kürünü tamamlaması sağlanmıştır. Sandviç kompozitler, yüzey ve çekirdek malzemelerinin epoksi bant ile birleştirilerek ve sıcak preste 90 °C'de 30 dk. ve 120 °C'de 60 dk. 3 bar basınç altında bekletilerek üretilmiştir. Üretilen sandviç panel kompozitlerden standartlara uygun olarak; eğilme, yüzey ve kenar doğrultusunda basma numuneleri alınıp eğilme ve basma deneylerine tabi tutulmuştur. Deney sonuçlarına göre, sandviç panellerde çekirdek malzemesinin yüzey malzemelerine kıyasla panel mekanik özelliklerinde daha belirgin değişimler oluşturduğu belirlenmiştir. Çekirdek malzeme olarak eğilme dayanımı ve kenara basma dayanımı açısından PET çekirdek malzemesi, eğilmede elastikiyet ve yüzeye basma mukavemeti açısından alüminyum bal peteği en iyi sonuçları göstermiştir. Bununla birlikte, PP köpük malzemeleri ile üretilen sandviç paneller ise diğer çekirdek malzemelerden üretilenlere göre önemli oranda yüksek uzama oranı göstermiştir.

**Anahtar kelimeler:** Sandviç paneller, Kompozit malzemeler, Bal peteği, Çekirdek malzemeler, Mekanik özellikler

#### Abstract

In this study, it was aimed to investigate the usability of sandwich panel technology as a frame material in order to decrease the weight of the frame material in the automotive sector while increasing the strength values of the chassis material. Carbon fiber, glass fiber polyester composites and aluminum plate were used as surface materials while aluminum honeycomb, polypropylene (PP) honeycomb and polyethylene terephthalate (PET) rigid foam were used as core materials. Surface composite materials are produced by wetting the glass and carbon fibre fabrics using polyester resins in layers by hand lay-up and compression method. It was provided that the plates completed their curing with a cold pressure at 50 bar for 720 minutes. The sandwich composites were produced by combining the surface and core materials with epoxy adhesive tape and holding under the hot pressure at 90 °C for 30 minutes and 120 °C for 60 minutes at 3 bar pressure. According to the standards of produced sandwich panel composites; bending, flatwise and edgewise in the direction of the compression samples were taken and subjected to bending and compression experiments. According to obtained experiment results; it was determined that core material is the more significant changes on the mechanical properties compared to surface materials. As a core material it was proven that Aluminum honeycomb core materials show the highest results in terms of bending and edgewise compression strength while PET core materials show highest results in terms of flexural stiffness and flatwise compression strength. However, it was seen that the panels with PP honeycomb core demonstrated considerably more elongation values than those of the other panels.

**Keywords:** Sandwich panels, Composite materials, Honeycomb, Core materials, Mechanical properties

## 1 Giriş

Kompozit malzemeler yapısal ve darbe dayanımı gerektiren uygulamalarda geleneksel malzemelerin yerine tercih edilmektedir. [1]. Özellikle sandviç kompozit paneller, yüksek enerji sönümleme kabiliyeti, hafiflik ve yüksek eğilme mukavemetleri nedeniyle yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bu bileşenlerin (sandviç panellerin) çoğu, çeşitli yüzey malzemeleriyle bal peteği ve köpük çekirdek malzemesinin bir araya gelmesiyle oluşmaktadır [2]-[4]. Özellikle, açık hücreli çekirdek malzemeye sahip sandviç kompozit paneller, kompozit malzemeye, yüksek rijitlik ve özgül mukavemet gibi çok fonksiyonlu yararlar sağlamaktadır [5]-[7].

Bu yapılar, genellikle hafif bileşen kullanımının önem arz ettiği; havacılık, denizcilik ve otomotiv endüstrisi gibi alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır [8]-[10].

Sandviç kompozit panellerde, yüzey malzemeleri sandviç bünyesinde rijit malzemelerden oluşarak kayma ve eğilme gerilmelerine karşı koyarak düzlemlerin birbirinden ayrılmasına karşı dayanıklı olmalıdır. Yüksek çevresel değişim toleransına ek olarak, yüksek özgül mukavemet ve rijitlik özelliklerinden dolayı elyaf takviyeli polimer kompozit yüzeylere sahip sandviç kompozit paneller, çeşitli mühendislik alanlarında önemli bir yapısal malzeme sınıfı olarak ortaya çıkmıştır [11].

Bal peteği sandviç yapılar, iki ince sert yüzey tabakası arasında ara katkılı kalın bir çekirdek malzemesinden oluşur. Bal peteği çekirdek malzemesi bir yandan sandviç panelin rijitliğini ve enerji sönümleme özelliğini korurken, diğer yandan boşluklu hücresel yapısı ile sandviç panelin hafiflik özelliği kazanmasını sağlamaktadır. Bu tür bal peteği sandviç kompozit paneller, otomotiv ve havacılık gibi yüksek yüklerin önem taşıdığı

uygulamalarda geleneksel malzemelerin yerine yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır [12]-[14].

Köpük sandviç kompozit paneller, yüksek elastikiyete sahip yüzey malzemesiyle, hafif düşük elastikiyete sahip köpük çekirdek malzemesinin bir araya gelmesiyle üretilerek, sıcaklık ve basınç altında ara yüzeyde kullanılan yapıştırıcıların sertleştirilmesi sonucu tamamen birleşmiş bir yapı meydana gelmektedir. Bu şekilde ortaya koyulan sandviç kompozit paneller, yüksek mukavemet/ağırlık oranı sunmakla birlikte, maksimum sertlik ve ezilme dayanımı gerektiren uygulama alanları için ideal birer malzeme haline gelmektedir [8]-[10], [12]-[14].

Sandviç plakalar ayrıca çift cidarlı kompozit kiriş olarak uygulama alanına da sahiptir. İki ince plaka arasına çekirdek malzemelerinin yerleştirilmesiyle; dış cidarların donatı ve geçici kalıp görevi yapması, çarpmaya ve patlamaya dayanıklı olması, aradaki çekirdek malzemenin ise uygulanan yükün dış cidar tarafından aktarılan enerjii absorbe etmesi sağlanabilir. Bu yüzden bu kompozitler yapı elemanları (kirişler) olarak giderek yaygınlaşmaktadır [20].

Bu çalışmada, karbon elyaf, cam elyaf ve alüminyum yüzey malzemelerinden ve polietilen tereftalat (PET) köpük, alüminyum bal peteği ve polipropilen (PP) bal peteği çekirdek malzemelerinden oluşan sandviç kompozit panellerin eğilme ve basma mukavemeti değerlerini karşılaştırarak eğilmeye ve basmaya karşı en iyi dayanım ve rijitlik özelliği gösteren panellerin belirlenmesi amaçlanmıştır.

## 2 Deneysel çalışmalar

Bu çalışmada, sandviç kompozit panellerin üretiminde, yüzey malzemesi olarak; 8 katmanlı karbon elyaf takviyeli polyester kompozit (KEPK), 8 katmanlı cam elyaf takviyeli polyester kompozit (CEPK ve alüminyum levhalar kullanılırken; çekirdek malzemesi olarak alüminyum bal peteği, PP bal peteği ve termoplastik polietilen tereftalat (PET) sert köpükler (Airex T92-100) kullanılmıştır. Üretilen sandviç kompozit panellerin bileşimi Tablo 1'de verilmiştir. Ayrıca, ara yüzey yapıştırıcısı olarak epoksi bant kullanılmıştır. Epoksi bantlar, SPM Kompozit ve İleri Malzeme Teknolojileri AŞ. firmasından temin edilmiştir. Çekirdek ve yüzey malzemesi olarak kullanılan malzemelerin yoğunlukları Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 1: Üretilen sandviç kompozit paneller.

Numune Kodu	Çekirdek Malzemesi	Yüzey Malzemesi	Yapıştırıcı
KAH	Alüminyum Bal Peteği	KEPK	Epoksi Bant
KPP	PP Bal Peteği	KEPK	Epoksi Bant
KPET	PET Köpük	KEPK	Epoksi Bant
CAH	Alüminyum Bal Peteği	CEPK	Epoksi Bant
CPP	PP Bal Peteği	CEPK	Epoksi Bant
CPET	PET Köpük	CEPK	Epoksi Bant
AAH	Alüminyum Bal Peteği	Alüminyum Levha	Epoksi Bant
APP	PP Bal Peteği	Alüminyum Levha	Epoksi Bant
APET	PET Köpük	Alüminyum Levha	Epoksi Bant

Tablo 2: Sandviç panel üretiminde kullanılan malzemelerin yoğunluk değerleri.

Malzeme	Yoğunluk
Karbon elyaf	1.4-1.5 g/cm <sup>3</sup>
Cam elyaf	1.7-1.8 g/cm <sup>3</sup>
Alüminyum	2.70-2.80 g/cm <sup>3</sup>
PP bal peteği	0.08 g/cm <sup>3</sup>
Alüminyum bal peteği	0.056-0.083 g/cm <sup>3</sup>
PET Köpük	0.08-0.1 g/cm <sup>3</sup>

Bu çalışmada, ilk olarak polyester matrisli farklı katman sayısında cam elyaf ve karbon elyaf yüzey malzemesi ile kompozit üretimi yapılarak en optimum elyaf hacim oranı ile en iyi mekanik özelliklerin elde edildiği kompozit malzemeler yüzey malzemesi olarak belirlenmiştir. Yüzey kompozit plakaları, 30x30 cm boyutlarında kesilen düz dokuma elyaf kumaşlar, polyester reçine ile ıslatıldıktan sonra temper cam kalıp kullanılarak soğuk baskı altında 12 sa. bekletilerek kürlenmesi sonucu üretilmiştir. Yüzey malzemelerinin üretiminden sonra yüzey malzemesi ile aynı boyutlara sahip çekirdek numuneleri kesilmiş ve epoksi bant ara yüzey yapıştırıcısı yüzey ve çekirdek malzemesi arasına uygulanmıştır. SPM firmasından temin edilen yapıştırıcı bant olarak kullanılan epoksi reçinenin tavsiye edilen kürlenme koşulları dikkate alınarak sandviç panellerin üretimi 90 °C'de 30 dk. 120 °C'de 60 dk. ve 5 bar basınç altında yapılmıştır. Mekanik test işlemleri için her bir sandviç panelden eğilme, kenara basma ve yüzeye basma testleri için 5'er adet test numunesi alınmıştır. Bütün çekme, basma ve eğilme testleri MTS criterion model üniversal test cihazında gerçekleştirilmiştir. Üretilen sandviç kompozitlerin eğilme mukavemeti değerleri ASTM C480 No.lu standartta göre ve eşitlik (1) yardımıyla hesaplanmıştır:

$$\sigma = \frac{PL}{2t(d+c)b} \quad (1)$$

Burada;

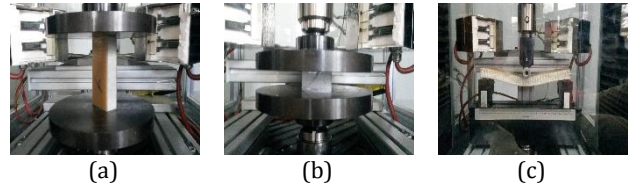
$\sigma$  = Yüzey malzemesinin eğilme gerilmesi (MPa),

$t$  = Yüzey malzemesi kalınlığı (mm),

$L$  = Ölçüm aralığı uzunluğu (mm),

$P$  = Uygulanan yük (N).

Kenara ve yüzeye basma testlerinde sırasıyla ASTM C364-99 ve ASTM C365-03 No.lu standartlar kullanılmıştır. Bu standartlara göre numunelere yük uygulanan hareketli çene ilerleme hızı 2.0 mm/dk. olmuştur. Kenara ve yüzeye basma test düzenekleri ile eğilme test düzeneği sırasıyla Şekil 1'de şematik olarak gösterilmiştir.



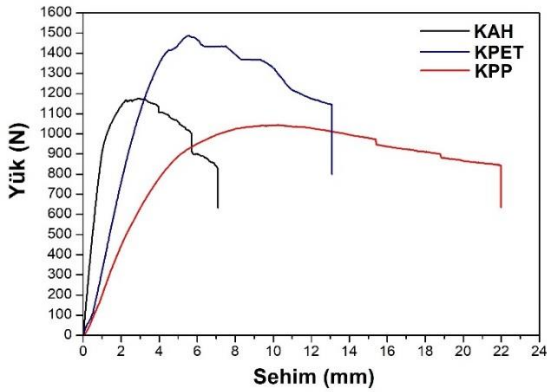
Şekil 1: Kullanılan test düzenekleri. (a): Kenara basma, (b): yüzeye basma ve (c): Eğilme test düzeneği.

## 3 Bulgular ve tartışma

Bu çalışmada, daha önce belirtilen farklı yüzey ve çekirdek malzemelerine sahip sandviç kompozit paneller üretilerek bunların eğilme ve basma (yüzey ve kenar doğrultusunda) dayanımları belirlenmiştir.

### 3.1 3-nokta eğilme testleri

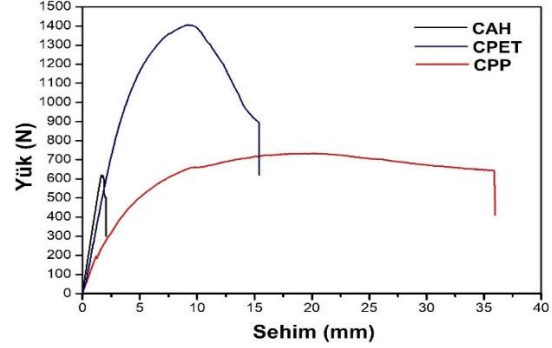
Tablo 3'te karbon elyaf yüzey malzemesi ve farklı çekirdek malzemelerine sahip sandviç kompozit panellerin 3-nokta eğilme testi sonuçları verilmiştir. Ayrıca eğilme mukavemeti ve uzama miktarlarına bağlı olarak elastisite modülleri hesaplanmıştır. Şekil 2'de bu kompozit panellere ait yük-sehim değerleri grafiksel olarak verilmiştir. Elde edilen sonuçlara bağlı olarak karbon elyaf yüzey malzemesine sahip sandviç panellere uygulanan 3-nokta eğilme testi sonuçlarına göre en yüksek (19.3 MPa) ve en düşük (11.6 MPa) eğilme mukavemetine sahip sandviç panellerin, sırasıyla, PET köpük ve alüminyum çekirdek malzemesine sahip sandviç kompozit paneller olduğu belirlenmiştir. Diğer yandan, PP bal peteği çekirdek malzemesine sahip sandviç panellerin en yüksek sehim miktarına (21.88 mm) sahip olduğu saptanırken, alüminyum çekirdek malzemesine sahip sandviç panellerin en düşük sehim miktarına (7.1 mm) sahip olduğu belirlenmiştir. Aslıhan ve diğ. [15] karbon epoksi yüzey malzemesine sahip sandviç malzemelerde iki farklı çekirdek malzeme yapısının mekanik özelliklere olan etkisini incelemişlerdir. Bu maksatla 3 boyutlu yazıcıdan üretilen naylon ve cam elyaf katkılı naylon polimerinden bal peteği desenli çekirdek malzemesi ile Alüminyum bal peteği çekirdek malzeme kıyaslanmıştır. Eğilme dayanımı ve basınç dayanımı açısından sırasıyla cam elyaf takviyeli 3d naylon balpetekli çekirdek malzemeden yapılan karbon/epoksi yüzeyli sandviç paneller en yüksek (53 ve 17 MPa), alüminyum bal peteğinden yapılan karbon/epoksi sandviç paneller ise en düşük (28 ve 4 MPa) sonuçları vermiştir. Kong ve diğ. [16] eğilme mukavemeti açısından karbon epoksi kaplı sandviç kompozitlerde alüminyum çekirdek malzemelerin köpük çekirdek malzemelere göre nispeten daha yüksek sonuçlar verdiği belirlenmiştir.



Şekil 2: Karbon elyaf yüzey malzemesine sahip sandviç kompozit panellerin yük-sehim grafiği.

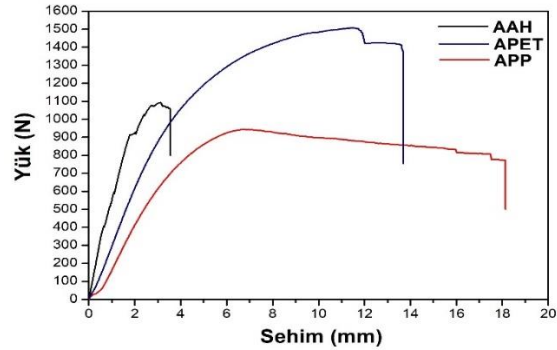
Tablo 4'te cam elyaf yüzey malzemesine sahip sandviç kompozit panellerinden elde edilen eğilme testi sonuçları verilmektedir. Ayrıca Şekil 3'ten bu kompozit panellere ait yük-sehim değerleri görülmektedir. Verilen tablo ve şekilden görüldüğü gibi cam elyaf yüzey malzemesine ve PET köpük çekirdek malzemesine sahip sandviç kompozit panellerin (CPET) eğilme mukavemeti 20.7 MPa olarak ölçülürken sehim miktarı bu kompozit paneller için 15.4 mm olarak belirlenmiştir. Ek olarak, cam elyaf yüzey malzemesi ve alüminyum bal peteği çekirdek malzemesinin kullanıldığı panellerden elde edilen eğilme mukavemeti değerinin (10.1 MPa), CPET panellerinkinin yaklaşık yarısı olmasına rağmen CPET panellerde hesaplanan elastisite modülünün CAH

panellerde belirlenen elastisite modülünün yaklaşık 2.5 katı olduğu görülmektedir. Ayrıca, en yüksek sehim miktarı, PP çekirdek malzemesinin sünek özellik göstermesinden dolayı bu malzemede; 35.96 mm olarak belirlenmiştir.



Şekil 3: Cam elyaf yüzey malzemesine sahip sandviç kompozit panellerin yük-sehim grafiği.

Alüminyum yüzey malzemesine ve farklı çekirdek malzemelerine sahip sandviç kompozit panellerin 3-nokta eğilme testi sonuçları Tablo 5'te verilmiştir. Bunun yanında Şekil 4'te bu sandviç panellere ait yük-sehim değerleri grafiksel olarak gösterilmiştir. Eğilme testleri sonucu, elde edilen değerlere bakıldığında, alüminyum yüzey malzemesi ve PET köpük çekirdek malzemesine sahip sandviç kompozit panellerin (APET) 18.6 MPa eğilme mukavemetine sahip olduğu ve gösterdiği uzama miktarının ise %2.38 olduğu saptanmıştır. Ancak alüminyum yüzey malzemesi ve alüminyum bal peteği çekirdek malzemesine sahip sandviç kompozit panellerde (AAH) ise APET sandviç panellere göre eğilme mukavemetinde dikkate değer bir azalma görülmezken (16.7 MPa), AAH sandviç panellerden elde edilen elastisite modülü değerinin (129.5 GPa), APET panellerden elde edilen değer (39.6 GPa) yaklaşık 3 katı olduğu belirlenmiştir. Bu durum alüminyum yüzey malzemesi kullanılan panellerde alüminyum bal peteği çekirdek malzemesinin PET köpük çekirdek malzemesine göre panelin kalıcı şekil değişimi meydana gelmeden dayanabileceği kuvveti büyük ölçüde arttırdığını açıkça göstermektedir. Ayrıca, APP kompozit panellerin yük-sehim grafiğine bakıldığında çekirdek malzemesinin (PP) sünek davranış göstermesinden dolayı, bu panellerde elde edilen sehim miktarı yaklaşık 18 mm olurken bu değer AAH numunelerden elde edilen uzama miktarının yaklaşık 3 katı olmuştur.



Şekil 4: Alüminyum yüzey malzemesine sahip sandviç kompozit panellerin yük-sehim grafiği.

Tablo 3: Karbon elyaf yüzey malzemesine sahip sandviç panellerin eğilme testi sonuçları.

Numune Kodu	Yüzey Malzemesi	Çekirdek Malzemesi	Elastisite Modülü (GPa)	Eğilme Mukavemeti (MPa)	Maksimum Yük (N)	% Uzama
KAH	Karbon elyaf	Alüminyum bal peteği	66.9	11.6	1195	1.07
KPP	Karbon elyaf	PP bal peteği	28.1	12.9	1490	1.88
KPET	Karbon elyaf	PET köpük	39.2	19.3	1046	1.10

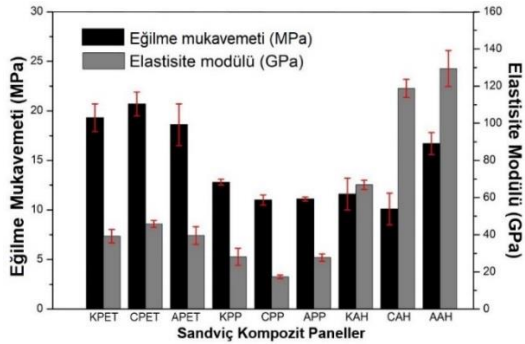
Tablo 4: Cam elyaf yüzey malzemesine sahip sandviç panellerin eğilme testi sonuçları.

Numune Kodu	Yüzey Malzemesi	Çekirdek Malzemesi	Elastisite Modülü (GPa)	Eğilme Mukavemeti (MPa)	Maksimum Yük (N)	% Uzama
CAH	Cam-elyaf	Alüminyum bal peteği	118.8	10.1	615	0.30
CPP	Cam-elyaf	PP bal peteği	17.4	11.1	1410	2.43
CPET	Cam-elyaf	PET köpük	45.9	20.7	732	1.91

Tablo 5: Alüminyum yüzey malzemesine sahip sandviç panellerin eğilme testi sonuçları.

Numune Kodu	Yüzey Malzemesi	Çekirdek Malzemesi	Elastisite Modülü (GPa)	Eğilme Mukavemeti (MPa)	Maksimum Yük (N)	% Uzama
AAH	Alüminyum	Alüminyum bal peteği	129.5	16.7	1102	0.46
APP	Alüminyum	PP bal peteği	27.7	11.1	935	1.42
APET	Alüminyum	PET köpük	39.63	18.6	1505	2.38

Şekil 5'te üretilen bütün sandviç kompozit panellere ait eğilme mukavemeti-elastisite modülü değerleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir.



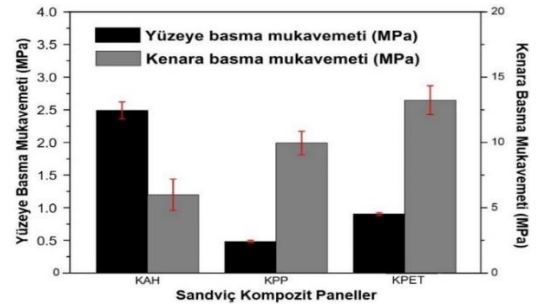
Şekil 5: Üretilen sandviç kompozit panellerin eğilme mukavemeti-elastisite modülü değerleri.

Grafikten görüldüğü gibi, en yüksek elastisite modülü değerlerine alüminyum bal peteği çekirdek malzemesinin kullanıldığı sandviç kompozit paneller sahip olmuştur. Bu durum özellikle alüminyum çekirdek malzemelerle yapılan sandviç panellerin düşük uzama değerleri göstermesi ile ilişkili olduğu belirlenmiştir. Akour ve diğ. [17] sandviç kompozit malzemelerde çekirdek malzeme rijitliğinde artışın panellerin yük taşıma kapasitelerine olumlu etki yaptığını belirlemişlerdir. Ayrıca rijitliği düşük çekirdek malzemelerde yük aktarımının daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Artan çekirdek malzeme elastikiyeti ile panel yüzey malzemelerinin çekirdek malzemelerden önce hasara uğradığı belirlenmiştir. Çekirdek malzemesi olarak PET köpüğün kullanıldığı sandviç kompozit paneller ise en yüksek eğilme mukavemeti değerlerini veren paneller olarak belirlenmiştir. Linul ve Marsavina [18], PET çekirdek malzeme üzerine alüminyum ve cam elyaf takviyeli yüzey malzemelerinin kullanımı durumunda sandviç kompozitlerde eğilme dayanımındaki

değişimini incelendiğinde cam elyaf takviyeli kompozit yüzey malzemeleri alüminyuma göre daha yüksek dayanım gösterdiğini tespit etmişlerdir.

### 3.2 Basma testleri

Bu çalışmada, üretilen sandviç kompozit panellere yüzeyleri ve kenarları doğrultusunda basma testleri uygulanmıştır. Buna göre, Şekil 6'da karbon elyaf yüzey malzemesine sahip sandviç kompozit panellerin yüzey ve kenar doğrultusunda basma testi sonuçları verilmiştir.

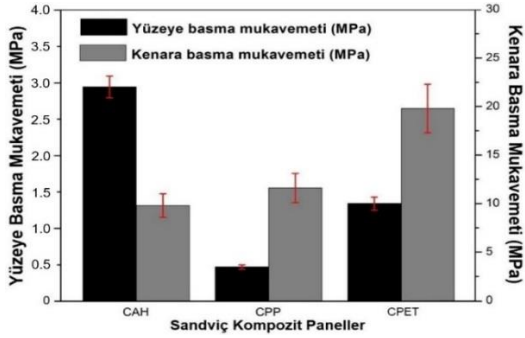


Şekil 6: Karbon elyaf yüzey malzemesine sahip sandviç panellerin basma testi sonuçları.

Kenar doğrultusunda yapılan basma mukavemeti değerleri karşılaştırıldığında, alüminyum bal peteği çekirdek malzemesi ve karbon elyaf yüzey malzemesine sahip sandviç panellerin (KAH) en düşük basma mukavemetine (6 MPa) sahip olduğu belirlenirken; PET köpük çekirdek malzemesi ve karbon elyaf yüzey malzemesine sahip sandviç panellerde (KPET) en yüksek basma mukavemeti değeri (13.2 MPa) elde edilmiştir. Yüzey ve çekirdek malzemesinin birleşme kalitesine bağlı olarak mukavemet değerleri değişiklik göstermektedir. Birleşme etkisinin en düşük olduğu KAH panellerde bu durum kenar doğrultusunda basma mukavemetinin en düşük değeri olmasıyla kendini göstermiştir. Diğer yandan; yüzey doğrultusunda yapılan basma testlerinde uygulanan bütün yük

yüzey malzemesi üzerinde yoğunlaştığı için, yüzey doğrultusunda gerçekleştirilen basma deneylerinde birleşme etkisinin çok düşük olduğu anlaşılmaktadır. Bu durum elde edilen basma mukavemeti değerlerinden açıkça görülmektedir. Buna bağlı olarak, KAH panellerde alüminyumun yüksek mukavemeti ve diğer çekirdek malzemelere göre sahip olduğu yüksek enerji absorpsiyon özelliğinden dolayı, yüzey doğrultusunda yapılan basma testleri sonucu diğer kompozit panellere göre en yüksek basma mukavemetine (2.49 MPa) sahip olduğu belirlenmiştir.

Cam elyaf yüzey malzemesine sahip sandviç kompozit malzemelere yüzey doğrultusunda ve kenar doğrultusunda uygulanan basma testleri sonuçları Şekil 7’de verilmiştir. Daha önce belirtildiği gibi, yüzey doğrultusunda uygulanan basma testleri sonucu elde edilen basma mukavemeti büyük ölçüde yüzey malzemesi ve çekirdek malzemesinin mukavemetine bağlı olurken; kenar doğrultusunda uygulanan basma testleri sonucu elde edilen basma mukavemetinde en büyük etkiyi yüzey ve çekirdek malzemesinin birleşme kalitesi göstermektedir. Bu bağlamda, aşağıdaki tablo incelendiğinde alüminyum bal peteğinin yüksek enerji absorpsiyonu ve mukavemetinden dolayı yüzey doğrultusunda yapılan basma testleri sonucu elde edilen en yüksek basma mukavemeti değeri (2.94 MPa) CAH panellerde görülmüştür. Diğer yandan PP bal peteğinin düşük mukavemetinden dolayı bu paneller yüzey doğrultusunda en düşük basma mukavemeti değerine (0.47 MPa) sahip olmuştur. Kenar doğrultusunda basma mukavemeti değerleri incelendiğinde ise yüzey-çekirdek malzemesi ara yüzeyindeki birleşme etkisinden dolayı basma mukavemeti değerleri düşüş göstermiş, kenar doğrultusunda en düşük basma mukavemeti değeri (9.8 MPa) CAH panellerde görülürken, en yüksek basma mukavemeti değeri (19.8 MPa) CPET panellerde belirlenmiştir.

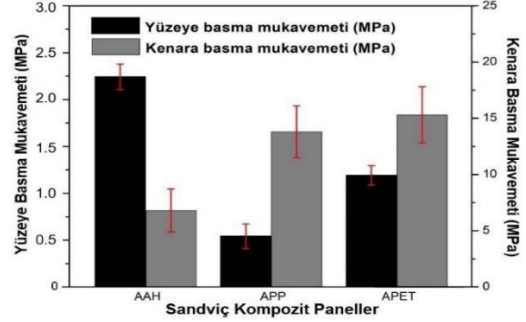


Şekil 7: Cam elyaf yüzey malzemesine sahip sandviç panellerin basma testi sonuçları.

Alüminyum yüzey malzemesine sahip sandviç kompozit panellere ait yüzey ve kenar doğrultusunda yapılan basma testleri sonucu Şekil 8’de verilmiştir. Bu panellerin, diğer kompozit panellere benzer olarak, yüzey doğrultusunda elde edilen basma mukavemeti değerlerinde, alüminyum bal peteği çekirdek malzemesi kullanıldığında AAH panellerde basma mukavemeti değeri en yüksek değere (2.24 MPa) ulaşmıştır. Ancak, bir kenarı doğrultusunda gerçekleştirilen basma testleri sonucunda ise basma mukavemeti AAH panellerde en düşük değer şeklinde ortaya çıkmıştır.

Çalışma kapsamında üretilen bütün sandviç panellere ait yüzey ve kenar doğrultusunda yapılan basma testleri sonucu elde edilen mukavemet değerleri karşılaştırılmıştır. Buna göre, yüzey doğrultusunda yapılan basma testleri sonucu elde edilen en düşük basma mukavemeti değerleri PP bal peteği çekirdek

malzemesine sahip panellerde görülürken, en yüksek mukavemet değerleri alüminyumun yüksek mukavemet değerlerine sahip olmasından dolayı, alüminyum bal peteği çekirdek malzemesine sahip panellerde görülmüştür. Diğer yandan, kenar doğrultusunda yapılan basma testleri sonucu en yüksek mukavemet değerlerine PET köpük çekirdek malzemesi kullanılan sandviç panellerde rastlanmıştır. Buradan anlaşılacağı gibi, kenar doğrultusunda yapılan basma testlerine mukavemete etki eden en önemli faktörün çekirdek malzemesinin yüzey malzemesi ile birleşme kalitesi olduğu göz önünde bulundurularak, PET köpük malzemesinin yüzey malzemesi ile en iyi birleşme etkisini gösterdiği anlaşılmıştır.



Şekil 8: Alüminyum yüzey malzemesine sahip sandviç panellerin basma testi sonuçları.

### 3.3 Basma testleri sonucu numunelerde meydana gelen hatalar

Şekil 9’da gösterildiği gibi numunelere uygulanan basma testleri (yüzey ve kenar doğrultusunda) sonucunda, bazı numunelerde basma hataları meydana gelmiştir. Şekil 9(a)’da verildiği gibi, karşılaşılan hatalardan birisi yüzey kabarma hatası olmuştur. Bu şekilde görülen hata PET köpük çekirdek malzemesinin düzlem dışı yüklerle yüksek oranda direnç göstermesi ile açıklanabilir. Bu durum ise çekirdek malzemenin kritik bozulma mukavemetinin, yüzey malzemesinin basma mukavemetinden daha yüksek olmasına yol açmıştır. Böylelikle, yüzey basma hatası meydana gelmiştir. Bu bağlamda, Solmaz ve diğ. [19], cam elyaf polyester kompozit yüzey örtüsünden üretilmiş alüminyum ve polyester kaplı kâğıttan çekirdek malzemeler ile üretilen sandviç kompozitlerde yük uygulaması sonucunda bölgesel hücre ezilmeleri, çatlaklar, yüzey ve hücre ayrılmaları gibi hasarlar gözlemlenmiştir.

Yapılan çalışmada basma testleri sonucu rastlanılan diğer bir hata türü ise Şekil 9(b)’de verildiği gibi çekirdek basma hatası olmuştur. Çekirdek malzemesi üzerine etki eden basma gerilmesi uygulanan orta düzeydeki yükün hemen altında maksimum değere ulaşmaktadır. Bu şekilden görüldüğü gibi, çekirdek malzemesi, üzerine uygulanan basma mukavemetinin çekirdek malzemesinin burulma direncini aşması sonucu çekirdek malzemesi girintiler/çıkıntılar oluşturmuştur. Buna bağlı olarak sandviç kompozit panelde bu yapısal hata meydana gelmiştir.

Şekil 9(c), sandviç panelde meydana gelen ve diğer bir hata türü olan yapışmama hatasını göstermektedir. Bu hata türü, yüzey malzemesinin basma kuvveti altında çekirdek malzemesinden ayrılmaya maruz kalmasıyla oluşmuştur. Yüzey malzemesi-çekirdek malzemesi arasında meydana gelen yapışmama durumu, çekirdek malzemesiyle yüzey malzemesi arasındaki dar temas alanına bağlı olarak birbirlerine birleşmesinin sağlanamaması sonucu meydana gelmiştir.

Basma kuvveti altında yüzey malzemesinde meydana gelen yığılma durumu karşılaşılan hatalardan birisi olmuş ve örnek olarak Şekil 9(d)'de gösterilmiştir. Bu hata türünde, şekilde görüldüğü gibi, ince yüzey malzemesi duvarlarının basma mukavemetine maruz kaldığı bölge yerel olarak zarar görmüş (bükülmüş) ve sandviç kompozit malzeme bu şekilde yapısal bir hataya uğramıştır. Ayrıca, bu hata, basma testi gerçekleştirilirken sandviç kompozit panel üzerine uygulanan yükün dalgalanmasına neden olmuştur.

Basma testlerinde karşılaşılan son hata türü yüzeyde görülen düzlemsel hatalardır. Aslında bu hata türü bir önceki bahsedilen hata türünün (yığılma durumu) sınırıyla aynıdır. Yüzey malzemesinin katmanlardan oluşması nedeniyle basma kuvveti altında katmanların kaymaya uğraması ve çekirdek malzemesinin olumsuz veya petek halinde olmayışından dolayı yüzey malzemesinin herhangi bir boşluğa yerleşememesi sonucu bu hata türü meydana gelmiştir (Şekil 9(e)). Bir başka deyişle, petek veya oluk halindeki çekirdek malzemelerinin kullanıldığı sandviç kompozit panellerde basma kuvveti altında çekirdek malzemesinin oluk veya petek boşluklarına sapmasıyla oluşan çukurlaşma hatasının yerini bu tür panellerde yüzeyde görülen düzlemsel kayma hatası almıştır.

#### 4 Sonuçlar

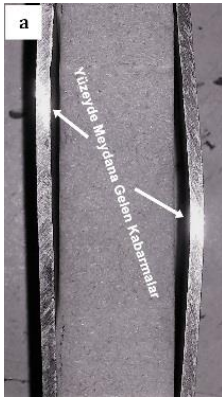
Bu çalışmada, karbon elyaf, cam elyaf ve alüminyum yüzey malzemelerinden ve PET köpük, alüminyum bal peteği ve PP bal peteği çekirdek malzemelerinden oluşan sandviç kompozit paneller üretilerek, üretilen sandviç kompozit panellerin eğilme ve basma mukavemeti değerleri karşılaştırılmıştır. Elde edilen değerlerin karşılaştırılması sonucu eğilmeye ve basmaya karşı en iyi direnç gösteren sandviç kompozit paneller

belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenmektedir:

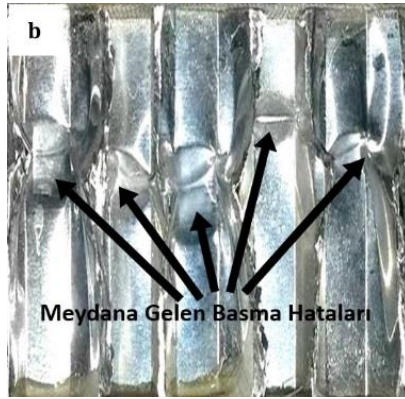
Karbon elyaf, cam elyaf ve alüminyum yüzey malzemesi ve alüminyum bal peteği, PP bal peteği ve PET köpük çekirdek malzemelerinden oluşan sandviç kompozit paneller başarıyla üretilmiştir. Eğilme mukavemeti ve yüzeye dik basma mukavemeti açısından PET köpük çekirdek malzemesinden üretilen sandviç kompozit paneller eğilme elastikiyeti ve yüzeye basma dayanımı açısından ise alüminyum bal peteğinden üretilen sandviç kompozit paneller en iyi sonuçları göstermiştir.

Kenar doğrultusunda yapılan basma testleri sonucu elde edilen değerlere göre en yüksek basma mukavemetine sahip panel CPET panel olurken; yüzey doğrultusunda yapılan basma testleri sonucu elde edilen değerlere göre en yüksek basma mukavemetine sahip panelin KAH (karbon elyaf yüzey malzemesi ve alüminyum bal peteği çekirdek malzemesinden oluşan sandviç panel) panel olduğu belirlenmiştir.

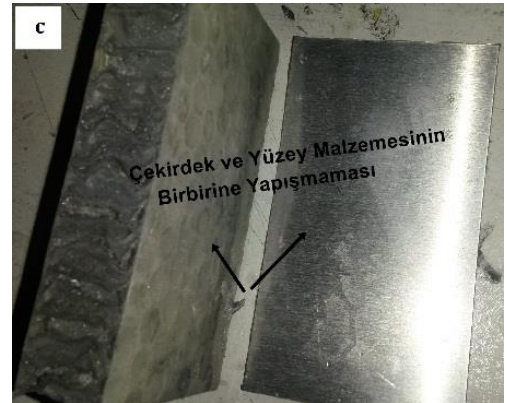
Elde edilen sonuçlara göre; eğilme ve basma test sonuçları açısından çekirdek malzemelerin yüzey malzemelerine göre sandviç panel mekanik özelliklerinde daha fazla etki ettiği görülmüştür. Bu bağlamda, en yüksek sehim miktarını gösteren sandviç paneller, PP çekirdek malzemesi kullanılan paneller olmuştur. Diğer yandan, yüzey doğrultusunda basma mukavemeti değerine etki eden en önemli faktörün çekirdek malzemesinin mukavemeti olduğu belirlenirken; kenar doğrultusunda basma mukavemeti değerini etkileyen en önemli faktörün çekirdek malzemesi ile yüzey malzemesi ara yüzeyinde oluşan birleşme kabiliyeti olduğu açıkça görülmüştür.



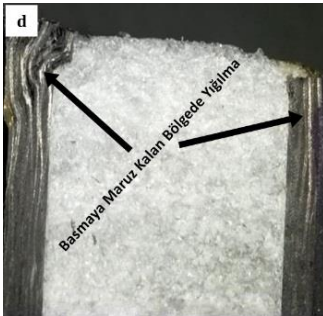
(a): Kabarma hatası



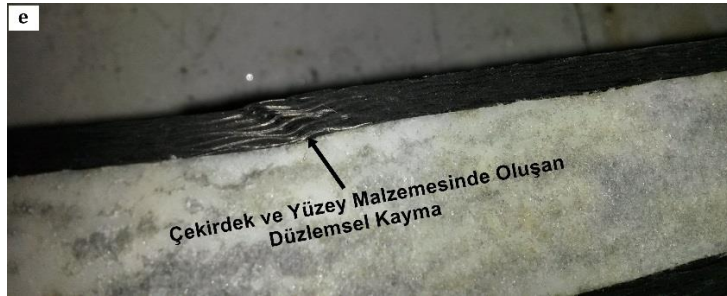
(b): Çekirdek basma hatası



(c): Yapışmama hatası



(d): Yığılma hatası



(e): Düzlemsel kayma hatası.

Şekil 9: Basma testleri sonucu sandviç kompozit panellerde meydana gelen hatalar.

## 5 Kaynaklar

- [1] Sokolinsky VS, Shen H, Vaikhanski L and Nutt SR. "Experimental and analytical study of nonlinear bending response of sandwich beams". *Composite Structures*, 60, 219-229, 2003.
- [2] Pan SD, Wu LZ, Sun YG et al. "Fracture test for double cantilever beam of honeycomb sandwich panels". *Materials Letters*, 62, 523-526, 2008.
- [3] Vaziri A, Xue Z, Hutchinson JW. "Metal sandwich plates with polymeric foam-filled cores". *Journal of Mechanics of Materials and Structures*, 1(1), 95-128, 2006.
- [4] Qin QH and Wang TJ. "Low-velocity impact response of fully clamped metal foam core sandwich beam incorporating local denting effect". *Composite Structures*, 96, 346-356, 2013.
- [5] 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.
- [6] Joo JH, Kang KJ, Kim T, Lu TJ "Forced convective heat transfer in all metallic wire-woven bulk Kagome sandwich panels". *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 54, 5658-5662, 2011.
- [7] Xiong J, Vaziri A, Ghosh R, Hu H, Ma L, Wu L. "Compression behavior and energy absorption of carbon fiber reinforced composite sandwich panels made of three-dimensional honeycomb grid cores". *Extreme Machines Letters*, 7, 114-120, 2016.
- [8] Niu MCY. *Composite Airframe Structures*. 1<sup>st</sup> ed. Hong Kong, Conmilit, 1992.
- [9] Quilter A. *Composites in Aerospace Applications*. Canada, ESDU International (An IHS White Paper), 2006.
- [10] Johnson CF, Rudd CD. *Manufacturing Process Selection for Composite Components*. Cambridge Press, 2000.
- [11] Gustin J, Joneson A, Mahinfalah M, Stone J. "Low velocity impact of combination Kevlar/fiber carbon sandwich composite". *Composite Structures*, 69 (4), 396-406, 2005.
- [12] 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.
- [13] Forsberg J, Nilsson L. "Evaluation of response surface methodologies used in crash worthiness optimization". *International Journal of Impact Engineering*, 32, 759-777, 2006.
- [14] Wang HP, Wu CT, Guo Y, Mark E, Botkin A. "Coupled meshfree/finite element method for automotive crash worthiness simulations". *International Journal of Impact Engineering*, 36(10-11), 1210-1222, 2009.
- [15] Sayılan A, Kaynan Ö, Yusufova A, Cebeci H, Yenigün EÖ. "Design and Development of 3D Printed High Performance Textile Structures for Composites". *Tekstil ve Mühendis*, 24(105), 13-17, 2017.
- [16] Kong CW, Nam GW, Jang YS, Yi YM. "Experimental strength of composite sandwich panels with cores made of aluminum honeycomb and foam". *Advanced Composite Materials*, 23(1), 43-52, 2014.
- [17] Salih N. Akour, Hussein Z. M. "Effect of core material stiffness on sandwich panel behavior beyond the yield limit". *Proceedings of the World Congress on Engineering*, London, UK, 30 June-2 July, 2010
- [18] Linul E, Marşavina L. "Assesment of sandwich beams with rigid polyurethane foam core using failure-mode maps". *The Publishing House of the Romanian Academy, Series A*. 16(4), 522-530, 2015.
- [19] Solmaz MY, Kaman MO, Turan K, Turgut A. "Petek yapıli kompozit levhaların eğilme davranışlarının incelenmesi" *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 22(1), 1-11, 2010.
- [20] Doğan O, Büyükkaragöz A. "Çift cidarlı kompozit kirişlerin sonlu elemanlar yöntemiyle gerilme analizi". *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 13(1), 39-45, 2007.