



Increasing Low-Velocity Impact Strength of Glass Fiber Sandwich Composites with Nanoparticle Reinforced Adhesive

Mehmet Emin ÇETİN^{1,*}

¹Necmettin Erbakan University, Faculty of Aeronautics and Astronautics, Department of Aerospace Engineering, Konya/Turkey

Graphical/Tabular Abstract

Article Info:

Research article
Received: 12/06/2021
Revision: 09/07/2021
Accepted: 27/07/2021

Highlights

- Sandwich composites.
- MWCNT addition.
- Polyurethane adhesive.
- Low-velocity impact.

Keywords

Sandwich composite panels
Nano adhesive
Carbon nanotube

In this study, glass fiber reinforced composite aluminum honeycomb sandwich panels were produced using three different adhesives (pure, 0.1% MWCNT, and 0.2% MWCNT added) and an 8.86 mm cell diameter core. Low-velocity impact tests were applied to sandwich structures at an initial energy level of 50 J in a test setup designed according to ASTM 7136 standard.

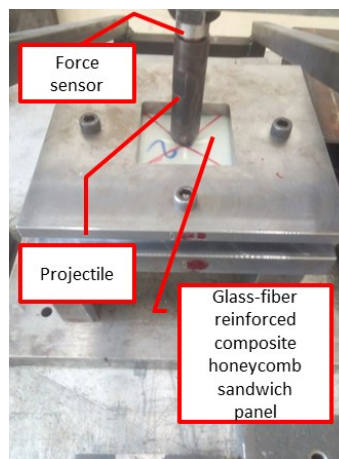


Figure A. Low-velocity impact test setup

Purpose: The original value of this study is to investigate the low-velocity impact properties of glass fiber honeycomb sandwich panels produced using MWCNT reinforced polyurethane-based adhesive. It is essential to improve the mechanical properties of adhesives in applications where adhesive connections are used in aircraft.

Theory and Methods: Sandwich structures with glass fiber composite surface and aluminum honeycomb core are fabricated using polyurethane-based MWCNT added adhesives. The specimens were analyzed in terms of load-time, load-deflection and energy-time behaviors. In addition, optical images were used to examine the deformation and damage properties of the sandwich panels.

Results: Load-time, load-deflection and energy-time graphs are used to evaluate the damage caused by low-velocity impact. The maximum contact forces of 0.1% MWCNT reinforced sandwich panels were approximately 3% higher than those produced using a neat polyurethane adhesive. Damage analyzes showed that the damaged area was narrower in the polyurethane adhesive specimens reinforced with MWCNT compared to the neat samples. Significant damage occurred in the specimens after the impact tests were applied at the 50 J energy level. The absorbed energy values due to the high-weighted projectile were close to each other for all specimens.

Conclusion: Examining the upper surface and cross-sections of the samples subjected to the impact test, fiber breakage and fracture, crushing and collapse of the honeycomb core were observed in glass-fiber sandwich panels. MWCNT addition increased cell density in polyurethane adhesives, increasing the impact strength of sandwich panels. The low-velocity impact performance of sandwich panels with glass fiber reinforced composite surface and aluminum honeycomb core can be improved with 0.1% MWCNT reinforcement.



Increasing Low-Velocity Impact Strength of Glass Fiber Sandwich Composites with Nanoparticle Reinforced Adhesive

Mehmet Emin ÇETİN^{1,*}

¹Necmettin Erbakan Üniversitesi, Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Havacılık ve Uzay Mühendisliği Bölümü, Konya/Türkiye

Abstract

The use of sandwich composite structures in the aerospace industry is increasing. Therefore, Improving the impact and other mechanical properties of sandwich composite panels (SCP) is essential for aviation safety. In the manufacture of SCPs, bonding with the lower and upper surfaces of the honeycomb structure is provided by bonding connections. So, by improving the mechanical properties of the adhesives used in SCP, the mechanical rigidity of the whole structure will be enhanced. In this study, sandwich composite panels were produced using glass fiber reinforced composite, three different adhesives (pure polyurethane, 0.1% and 0.2% multi-walled carbon nanotube reinforced polyurethane) and an aluminum honeycomb with a cell diameter of 8.86 mm. Low-velocity impact tests were applied to the manufactured sandwich composites at the initial energy level of 50 J. After impact tests, load-time, load-deflection and energy-time graphs were obtained, and the effect of multi-walled carbon nanotube (MWCNT) contribution was evaluated. Also, the effect of the MWCNT addition on impact properties was determined by making a damage analysis. It was observed that the carbon nanotube addition to the polyurethane adhesive increased the maximum contact force by 3%, improving the low-speed impact properties of SCPs.

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
 Başvuru: 12/06/2021
 Düzeltme: 09/07/2021
 Kabul: 27/07/2021

Keywords

Sandwich composite panels
Nano adhesive
Carbon nanotube

Anahtar Kelimeler

Sandviç kompozit panel
Nano yapıştırıcı
Karbon nanotüp

Cam Fiber Sandviç Kompozitlerin Düşük Hızlı Darbe Mukavemetinin Nano Parçacık Takviyeli Yapıştırıcı Kullanılarak Artırılması

Öz

Sandviç kompozit yapıların havacılık ve uzay endüstrisinde kullanımını artmaktadır. Bu nedenle sandviç kompozit panellerin (SKP) darbe ve diğer mekanik özelliklerinin geliştirilmesi havacılık emniyeti açısından önem arz etmektedir. SKP'lerin imalatında bal peteği yapının alt ve üst yüzeyler ile bağı yapıştırma bağlantıları ile sağlanmaktadır. Dolayısıyla SKP'de kullanılan yapıştırıcıların mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi ile bütün yapının mekanik rijitliği iyileştirilmiş olacaktır. Bu çalışmada cam fiber takviyeli kompozit, üç farklı yapıştırıcı (saf poliüretan, ağırlıkça %0,1 ve %0,2 çok cidarlı karbon nanotüp katkılı poliüretan) ve 8,86 mm hücre çapında alüminyum bal peteği kullanılarak sandviç kompozit paneller üretilmiştir. Üretimi yapılan sandviç kompozitlere 50 J ilk enerji seviyesinde düşük hızlı darbe testleri uygulanmıştır. Darbe deneyleri sonrasında yük-zaman, yük-sehim ve enerji zaman grafikleri elde edilerek çok cidarlı karbon nano tüp (ÇCKNT) katkısının etkisi değerlendirilmiştir. İlave olarak, hasar analizi yapılarak ÇCKNT katkısının darbe özelliklerine etkisi belirlenmiştir. Poliüretan yapıştırıcıya karbon nano tüp katkısının en büyük temas kuvvetini %3 oranında artırarak SKP'lerin düşük hızlı darbe özelliklerini iyileştirdiği görülmüştür.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Havacılık ve uzay endüstrisinde kullanılan malzemelerde rijitlik ve hafiflik özellikleri ön plana çıkmaktadır [1–4]. Sandviç kompozit yapılar havacılık, denizcilik, uzay, raylı sistem endüstrisi ve astronomi gibi alanlarda yoğun olarak tercih edilmekte ve bu malzemelere olan ilgi artarak devam

ekmektedir [5–7]. Yolcu uçaklarının kanat ve kuyruk parçalarında ve buna ek olarak taban kaplaması bölümlerinde sandviç yapılar yer almaktadır [1,2]. Cam ve karbon fiber takviyeli sandviç paneller helikopterlerin kuyruk, gövde, kanat ve kargo kapısı kısımlarında tercih edilmektedir [1,2]. Uyduların gövde, güneş paneli ve yansıtıcı anten bölümlerinde karbon fiber kompozit alüminyum bal peteği sandviç paneller kullanılmaktadır [1,2]. Boeing Dreamliner-787 yolcu uçağının kanatçık, yön ve yükseliş dümenlerinde ve motorunun dış gövde kısmında karbon fiber sandviç kompozit yapıların kullanılması, bu panellerin yolcu uçaklarında tercih edilmesine örnek olarak verilebilir (Şekil 1) [8]. Sandviç kompozit panellerin bu alanlarda kullanımını için mekanik özelliklerinin tespit edilmesi gerekmekte ve mekanik özelliklerinin istenilen düzeyde olabilmesi için birçok çalışma yapılmaktadır [9–17].



Şekil 1. Boeing Dreamliner-787 uçağının gövde, kanat ve kuyruk kısmında kullanılan malzemeler [8]

Sandviç panellerin kendilerinden arzu edilen özellikleri sağlaması için farklı malzemeler ve imalat yöntemleri kullanılarak üretimleri yapılmaktadır. Sandviç panellerin üst ve alt yüzeylerinde bakır, çelik, alüminyum ve polimer kompozit malzemeler kullanılmaktadır [5,6]. Sandviç yapıların çekirdek malzemesi olarak köpük, fenolik reçine emdirilmiş aramid, polimer, ahşap ve alüminyum alaşımları kullanılmaktadır [5,6,18]. Sandviç kompozit paneller; yüzeylerine yapıştırıcı sürülmüş iki rijit yüzey arasına hafif çekirdek malzemenin yerleştirilmesi ve birleştirilmesi işlemiyle imal edilmektedir. Bal peteği, köpük, oluklu, üçgen ve dörtgen yapıya sahip çekirdek malzemeleri uygulamada yer almaktadır [5,6,18]. Sandviç panellerde kullanılan üst ve alt yüzeyler ince ve mukavemetli yapıdayken, çekirdekler ise hafif fakat yüzeylere göre dayanım açısından daha zayıftır. Çekirdek malzeme eğilme yüklerini, alt ve üst yüzeyler ise çekme-basma yükünü taşıyarak sandviç panellerin I profil davranışı göstermesini sağlarlar. Buna ek olarak çekirdek yapı kayma gerilmelerine karşı direnç göstermektedir. Çekirdek yapı üst ve alt yüzey arasındaki mesafeyi sabit tutarak üst ve alt yüzeylere destek sağlamakta ve bu yolla sandviç panelin yapısal rijitliği artmaktadır [5,6,18]. Çekirdek, üst ve alt yüzey ve yapıştırıcı tek bir bütün oluşturmaktadır.

Sandviç kompozit paneller imal edilirken üst ve alt yüzeylerde bal peteği yapının yapıştırılmasında nitril fenolik, epoksi, poliamid ve poliüretan tipi yapıştırıcılar tercih edilse de endüstriyel uygulamalarda genellikle poliüretan bazlı yapıştırıcıların kullanımı öne çıkmaktadır [19–21]. Yapıştırma bağlantıları farklı sektörlerdeki birçok endüstri uygulamasında ve kompozit malzemelerin birleştirme işlemlerinde hafiflik, uygulama kolaylığı ve düşük maliyet nedeniyle artan bir kullanıma sahiptir [19–21]. Bununla birlikte yapıştırma bağlantısı tercih edilmesi sayesinde gerilme yığılmaları azaltılarak yapıların yorulma ve korozyon dayanımları artırılmaktadır [19–22].

Zhou ve Hill [23] yaptıkları çalışmada bal peteği kompozit yapıların basma mukavemetlerine kıyasla kesme ve eğilme mukavemetlerinin daha zayıf olduğunu göstermişlerdir. Bu durumun uygulanan yükten etkilendiğini ve oluşan hasarın genelde yapıştırma bağlantısı bölgesinde ayrılma şeklinde olduğunu vurgulamışlardır. Jhen ve Chang [24] darbe kuvveti uygulaması sonucunda üst ve alt yüzey ile çekirdek arasında ayrılmaların göze çarptığını belirtmişlerdir. Bal peteği kullanılan sandviç panellerin darbelere karşı dayanımının farklı mekanik özelliklere sahip yapıştırıcıların kullanımı ile iyileştirilebileceğini Jen vd. [25] yaptıkları çalışmada söylemişlerdir. Bu alanda yapılan son çalışmalar nano katkı yapıştırıcıların

endüstriyel uygulamalarda kullanımının arttığını ve yapıştırılan yüzeyler arasında kenetlenmeyi iyileştirdiğini göstermektedir [10,26–29]. Nano partiküller yapılarında barındırdıkları olağanüstü mekanik özellikler sayesinde, nanoyapıştırıcılar ve nanokompozitleri geliştirmek için yenilikçi bir alan oluşturmuşlardır [21,30,31]. Nano partikül türlerinden biri olan ÇCKNT'ler üstün tribolojik, termal ve mekanik özellikleri nedeniyle birçok mühendislik uygulamasında kullanım için eşine az rastlanan bir malzeme türü olarak gösterilmektedir [21].

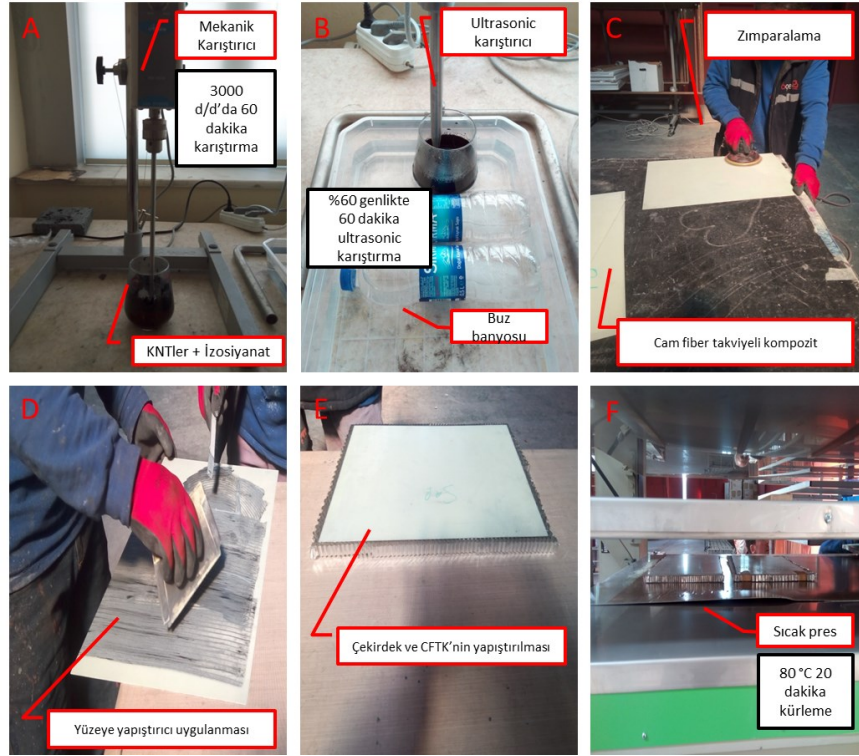
Kompozit malzemelerde nano katkı yapıştırıcıların kullanıldığı uygulama alanları mevcuttur. Fakat cam fiber kompozit yüzeye ve alüminyum balpeteği çekirdeğe sahip sandviç yapıların üretiminde poliüretan bazlı ÇCKNT katkı yapıştırıcıların kullanıldığı çalışma literatürde yer almamaktadır. Buna ek olarak darbeye karşı hassas olduğu bilinen bu yapıların düşük hızlı darbe davranışları da incelenmemiştir. Bu çalışmanın özgün değeri, ÇCKNT takviyeli poliüretan bazlı yapıştırıcı kullanılarak üretilen cam fiber altıgen sandviç panellerin düşük hızlı darbe özelliklerinin incelenmesidir. Hava araçlarında yapıştırma bağlantılarının kullanıldığı uygulamalarda yapıştırıcıların mekanik özelliklerinin geliştirilmesi önem arz etmektedir. Bu çalışma sayesinde, ülkemiz havacılık endüstrisinde yapılan çalışmalara malzeme geliştirme odaklı katkı sağlanmış olacaktır.

2. MATERYAL VE METOTLAR (MATERIALS AND METHODS)

Cam fiber takviyeli kompozit (CFTK) malzeme üretimi için 110 gr/m² yoğunluklu düz örgülü atık prepreg kumaş kullanılmıştır. Reçine hacim oranı % 35'tir. CFTK prepregleri 50x200 cm boyutlarında kesilmiştir. Çelik bir kalıba yapıştırılmadan önce izopropil alkol (İPA) ile temizlenmiş teflon bantlar üzerine 14 kat olarak el yatırma tekniği ile yerleştirilmiştir. PLC kontrollü bir sıcak pres kullanılarak 120 °C'de 4 Bar basınç altında 1 saat kürlenmiş ve soğumaya bırakılmıştır. Üretim sonrası üretilen CFTK kalınlığı 1,5± 0,05 mm olarak ölçülmüştür.

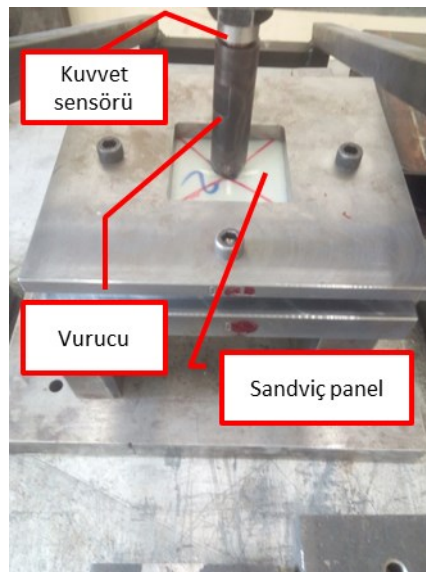
Poliüretan yapıştırıcı izosiyanat ve polioliol olmak üzere iki bileşen halinde temin edilmiştir (Sege). Polioliol ve izosiyanatın karışım oranı ağırlıkça 5:1'dir. ÇCKNT'ler 10-20 nm çaplarında ve 10-30 µm uzunluğunda ve %95 saflıkta temin edilmiştir (US Research Nanomaterials Inc.). %0,1 ve %0,2 olmak üzere iki farklı ağırlık oranında ÇCKNT poliüretan yapıştırıcıya eklenmiştir. İzosiyanat içerisinde ÇCKNT'leri dağıtmak için 3000 rpm devir sayısında 60 dakika mekanik karıştırma ve 60 dakika %60 genliğinde ultrasonik karıştırma işlemi buz banyosu içerisinde uygulanmıştır (Şekil 2 (a) ve (b)) [32,33]. ÇCKNT içeren izosiyanatın polioliol ile mekanik karıştırıcıda 12 saniye 400 d/d karıştırılmasıyla nano katkı poliüretan yapıştırıcı elde edilmiştir. ÇCKNT takviyesinin etkisini karşılaştırmak için saf yapıştırıcı polyol ve izosiyanatın 5:1 ağırlık oranında karıştırılması ile hazırlanmıştır.

CFTK, nano katkı ve saf poliüretan yapıştırıcıların hazır hale getirilmesinin ardından sandviç panel üretim aşamasına geçilmiştir. Sandviç panel imalatında kullanılacak CFTK malzemenin yüzeyi P100 zımpara ile zımparalanmıştır (Şekil 2 (c)). İPA ile yüzeyi temizlenerek yüzeyde yapışma yüzey alanını azaltarak yapışma mukavemetini düşmesine neden olacak kirlilikler uzaklaştırılmıştır [13]. Alüminyum 3005-H19 alaşımından üretilmiş bal peteği altıgen çekirdekler 0,05 mm hücre cidarı kalınlığında, 8,66 mm hücre çapında ve 13 mm hücre yüksekliğinde Altıgen Uzay Havacılık Gemi İnş. Panel San. Ve Tic. Ltd. Şti.'den temin edilmiştir. CFTK, poliüretan bazlı saf ve ÇCKNT katkı yapıştırıcı ve çekirdek hazır hale getirilmiştir. Daha sonra CFTK yüzeyine yapıştırıcı bir tarak vasıtasıyla uygulanmıştır (Şekil 2 (d)). Bunu takiben çekirdeklerin alt ve üst yüzeyine yapıştırıcı uygulanmış CFTK yüzeyler yerleştirilmiştir (Şekil 2 (e)). Yapıştırılan SKP'ler 20 dakika 80 °C'de sıcak pres kullanılarak (Umur Makine Sanayi) 1 Bar basınç altında kürlenmiştir (Şekil 2 (f)). Sandviç panel üretiminin tamamlanmasından sonra yapıştırıcının kürlenmesinin tamamlanması için sandviç paneller oda sıcaklığında bir hafta bekletilmiştir. CFTK sandviç paneller 100x100x16 mm³ boyutlarında elektrikli testere yardımıyla kesilerek düşük hızlı darbe testleri için hazır hale getirilmiştir.



Şekil 2. Cam fiber takviyeli alüminyum çekirdek sandviç panellerin imalatı

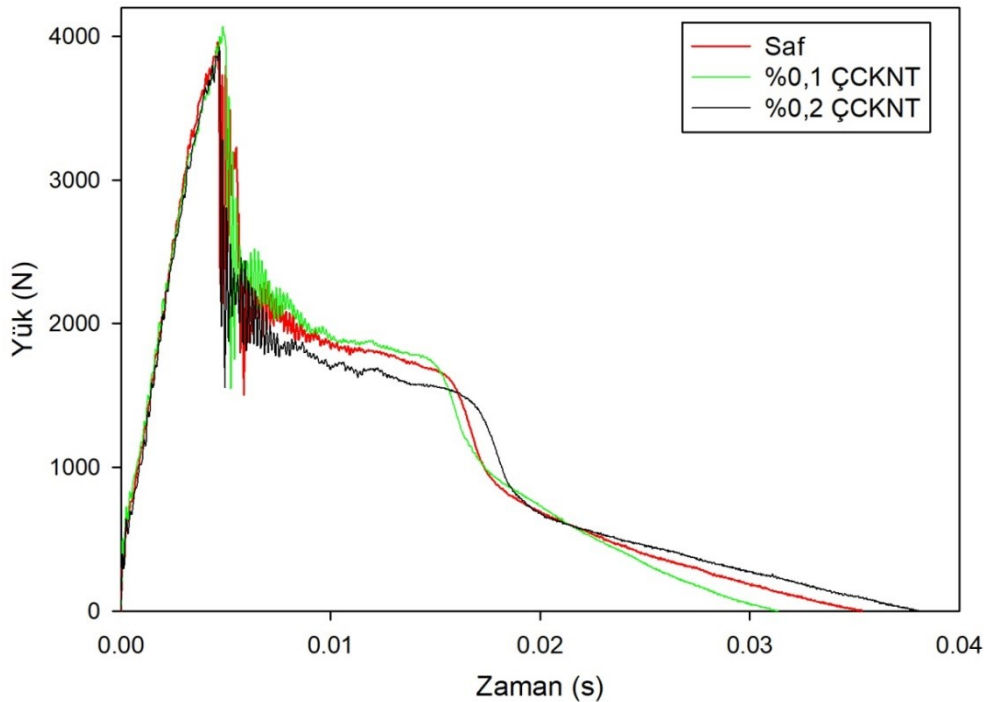
Düşük hızlı darbe testleri ASTM D7136 standardına göre hazırlanmış bir deney düzeneği ile gerçekleştirilmiştir [34]. Numuneler 75x75 mm orta açıklığı bulunan bir kalıp içerisine dört tarafı ankastre mesnet olacak şekilde yerleştirilmiştir. Belirlenen bir yükseklikten 20 kg ağırlık ve 12 mm çapa sahip vurucu sandviç panellerin belirlenmiş merkezlerine 50 J ilk enerji seviyesinde düşürülmüştür (Şekil 3). Testler sırasında ICP kuvvet sensörü (202 B) vurucu ve ağırlık arasına yerleştirilerek yük-zaman eğrisi elde edilmiştir. National Instruments (NI) Signal Express yazılımı veri işleme için kullanılmıştır. Düşük hızlı darbe testleri her bir durum için en az üç defa tekrarlanmıştır.



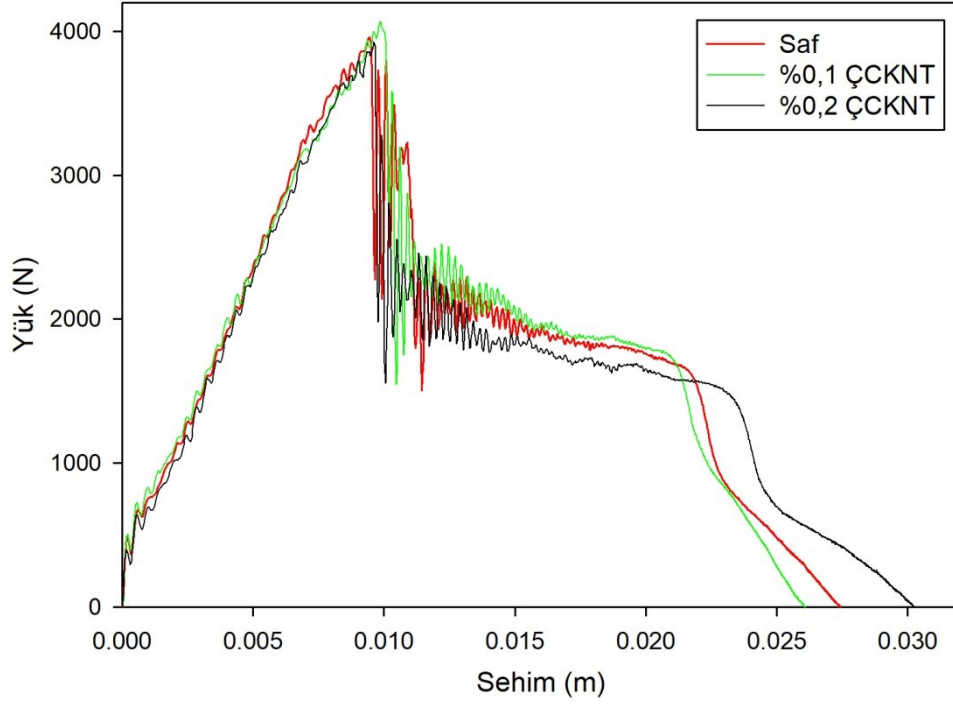
Şekil 3. Düşük hızlı darbe test düzeneği

3. BULGULAR VE İRDELEME (RESULTS AND DISCUSSION)

Bu çalışmada ÇCKNT katkıli poliüretan yapıştırıcının cam fiber kompozit yüzeye ve alüminyum çekirdeğe sahip sandviç panellerin düşük hızlı darbe davranışına etkisi incelenmiştir. 50 J ilk enerji seviyesinde darbe testleri gerçekleştirilmiş ve numunelerin hasar durumları değerlendirilmiştir. Şekil 4 ve Şekil 5'te sırasıyla yük-zaman, yük-sehim grafikleri gösterilmiştir. Yük-zaman ve yük-sehim eğrileri incelendiği zaman, eğrilerde dalgalanmalar olduğu ve yükleme ve boşaltma kısımlarının simetrik olmadığı görülmektedir. Düşük hızlı darbe yüklemesi altında, herhangi bir malzeme ilk aşamada sürtünmeli elastik deformasyonla enerjiyi emer. Eğer yükleme seviyesi elastik deformasyonun üst sınırını aşarsa, numune deformasyon sırasında gevrek malzemeler için hasar mekanizmaları ve sünek malzemeler için plastik deformasyon yoluyla bu ekstra enerjiyi emer. Dolayısıyla sandviç panellerin üst ve alt kısımları kırılğan CFTK'dan üretilmiş olduğu için bu ekstra enerji kompozit üst yüzeyde delaminasyon ve fiber kopması hasarlarına sebep olur. CFTK altıgen sandviç panellerde ilk hasar CFTK üst yüzeyinde girinti şeklinde başlar, altıgen çekirdekte kayma kırılması, hücrelerin çökmesi ve ezilmesi şeklinde devam eder. Tablo 2 ve Şekil 6 'da deneylerden elde edilen sonuçlar hata payları ile birlikte verilmiştir. Tablo 1 ve Şekil 6'dan %0,1 ÇCKNT katkıli numune ile saf numune karşılaştırıldığında ÇCKNT takviyesinin en büyük temas kuvvetini 3961 N'dan 4066 N'a çıkarttığı bununla birlikte temas süresini ve sehimini de azalttığı görülmektedir. ÇCKNT katkısı en büyük temas kuvvetini %3 yakın oranda artırmıştır. Uğur vd. [10] çalışmalarında %1 ÇCKNT katkısının alüminyum balpeteği sandviç panellerin darbe özelliklerine etkisini incelemişlerdir. Saf epoksi yapıştırıcılı numunelere göre en büyük temas kuvveti değerinde ÇCKNT katkıli numunelerde %4 ile %6 arasında değişen oranda artış sağlamışlardır. Bu çalışmada ise sağlanan %3'e yakın artış %0,1 ÇCKNT katkısı ile sağlanmıştır. Bu nedenle bütün panellerde kullanılan yüzey plakası ve balpeteği aynı olduğu için yapıştırıcıya yapılan ÇCKNT katkısı ile darbe özelliklerinin bu oranda artırılabilmesi sandviç panellerin geliştirilmesine katkı sağlayacaktır. Sandviç kompozit malzemelerin üretiminde kullanılan kompozit malzemelere veya yapıştırıcılara nanopartikül katkısı üretim maliyetini artırabilir. Fakat sandviç kompozit malzemeler makalenin giriş kısmında belirtildiği gibi havacılık ve uzay uygulamalarında kullanılmaktadır. Hava ve uzay araçlarında kullanılan malzemelerin mekanik özelliklerinde sağlanacak artış uzun vadede daha dayanıklı malzeme sayesinde bakım maliyetlerinin düşmesine sebep olacaktır. Dolayısıyla bu çalışmada sandviç kompozit panellerin düşük hızlı darbe özelliklerinde sağlanan %3 artışın havacılık ve uzay uygulamalarına önemli bir katkı sağlayacağı düşünülmektedir. Ayrıca grafiklerden ÇCKNT katkısının %0,1'den %0,2'ye çıkmasının sehimini artırdığı, temas süresini ve en büyük temas kuvvetini 4066 N'dan 3922 N'a düşürdüğü anlaşılmaktadır.



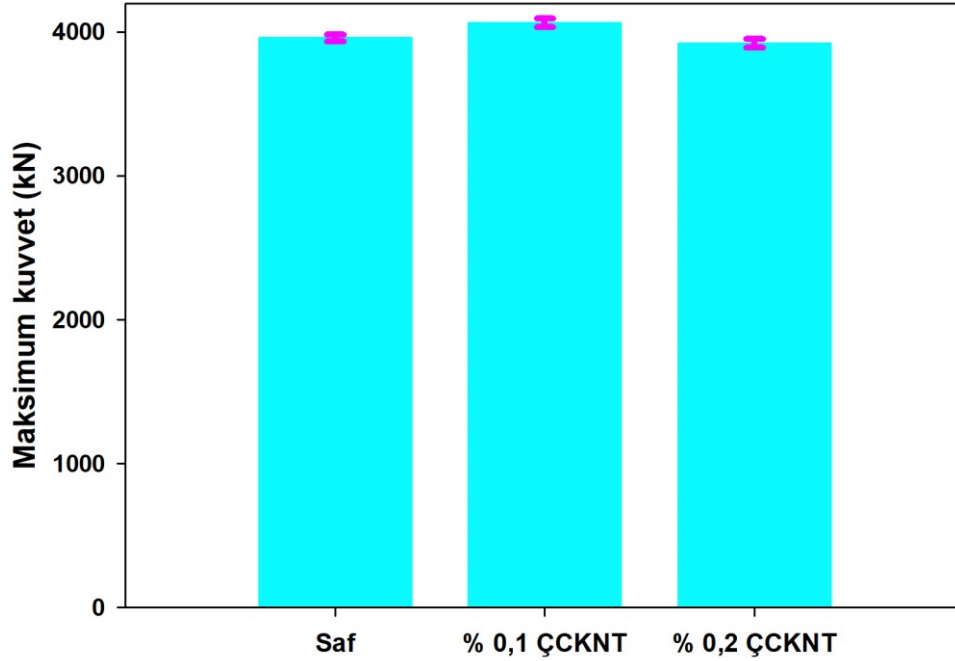
Şekil 4. Yük-zaman eğrisi



Şekil 5. Yük- sehim eğrisi

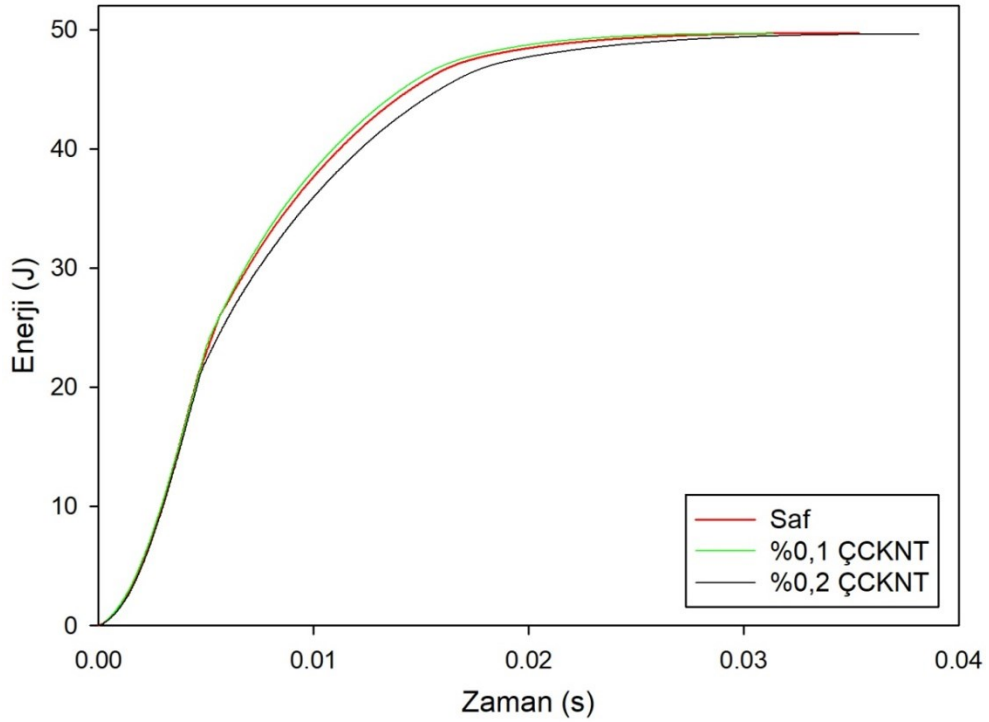
Tablo 1. Darbe testlerinde elde edilen maksimum kuvvet değerleri

Numune	Hücre genişliği (mm)	Hücre yüksekliği (mm)	Maksimum Kuvvet (N)
Neat	6.78	18	3961±9
%0,1 ÇCKNT	6.78	18	4066±10
%0,2 ÇCKNT	6.78	18	3922±12



Şekil 6. Maksimum kuvvet değerlerinin sütun grafiği şeklinde gösterimi

Çağlayan vd. [9] çalışmalarında ÇCKNT katkısının poliüretan köpük çekirdekli sandviç panellerin mekanik özelliklerine etkisini incelemişlerdir. %0,1 ÇCKNT katkısı sandviç panelin mekanik özelliklerini önemli ölçüde iyileştirirken %0,2 ÇCKNT katkısının mekanik özelliklerde bir miktar düşüşe neden olduğunu belirtmişlerdir. Bu düşüşün sebebini %0,1'den daha fazla ÇCKNT katkısının topraklanmayı artırarak mekanik özelliklerde düşmeye neden olmasıyla açıklamışlardır. Dolayısıyla bu çalışmada da %0,2 ÇCKNT katkısının sandviç panellerin en büyük temas kuvveti değerlerinde azalmaya neden olması; artan ÇCKNT katkısı ile topraklanmaların artması ve mekanik özellik değerlerinin azalmasıyla açıklanabilir. Yük-sehim eğrisinin başlangıcından yük maksimum değere ulaşıncaya kadar numune darbe yüküne direnç göstermekte ve bu eğrinin eğimi yapısal rijitlik olarak isimlendirilmektedir. ÇCKNT katkısının yapısal rijitliği artırdığı anlaşılmıştır. Yük-zaman ve yük-sehim eğrilerinin yükleme ve boşaltma kısımlarında dalgalanmalar mevcuttur. Bu olgunun sebebi darbe bölgesinin tam altında kompozit yüzdeki tabakaların ayrılması ve kırılması, altıgen çekirdeğin ezilmesi ve bükülmesidir. Yük maksimum kuvvete ulaşıttan sonra hızlı bir şekilde düşer. Kompozit yüzey ve bal peteği çekirdekdeki hasarların yapıyı daha rijit bir hale getirmesiyle tekrar artmaya başlar. CFTK fiberlerin kırılması ve kopmasına büyük oranda direnç göstererek dayanımı artırır. Yapıştırıcıya ÇCKNT takviye edilmesiyle yapıştırıcının rijitliği artırılmıştır. Bununla birlikte nano partiküllerin yapışma yüzeyini artırma özelliği nedeniyle saf numunelere göre poliüretan yapıştırıcıya ÇCKNT takviyesi sandviç panellerin darbe dayanımı artırmıştır. Ayrıca poliüretan yapıştırıcılara ÇCKNT eklenmesinin köpük yapıda daha kalın hücre duvarları ve birim hücre başına daha fazla hücre duvarına sahip olmasına neden olarak daha dayanıklı yapıştırıcı ve buna binaen daha dayanıklı sandviç panel üretilmesine sebep olduğu söylenebilir [35]. Numunelerin darbe deneyleri sırasında emdiği enerji değerleri enerji-zaman grafiği olarak Şekil 7'de verilmiştir. Kullanılan vurucu ağırlığı 20 kg olduğu için emilen enerji değerlerinde kayda değer bir farklılık görülmemiştir.



Şekil 7. Enerji-zaman eğrisi

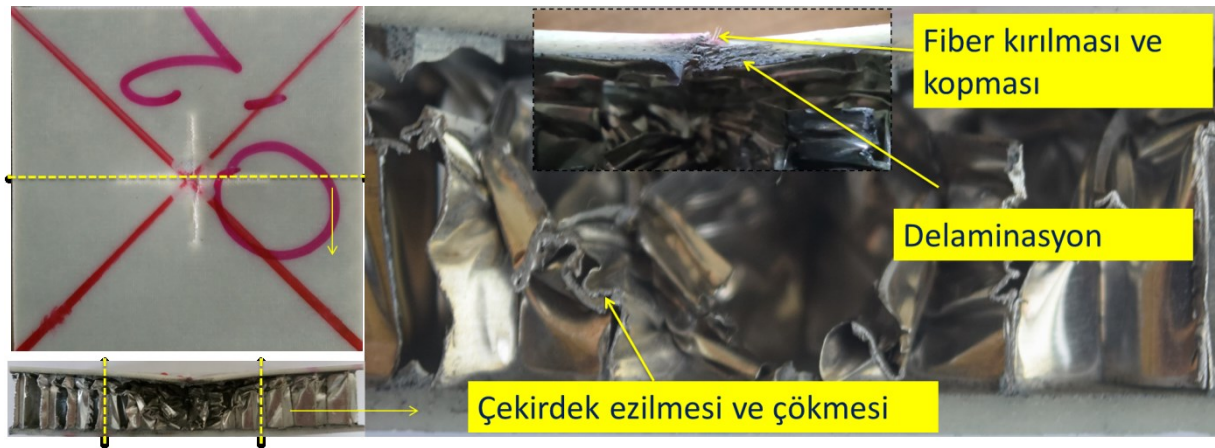
Saf ve ÇCKNT ile takviye edilmiş sandviç panel numunelerin darbe yüzeyi ve hasar bölgesinin kesit görünüşleri Şekil 8, Şekil 9 ve Şekil 10'da gösterilmiştir. 50 J ilk enerji seviyesinde uygulanan düşük hızlı darbe testlerinden sonra, vurucunun kompozit üst yüzeye girinim yaptığını ve vurucunun altında kalıcı hasarın oluştuğu görülebilmektedir. Buna ek olarak CFTK üst yüzeyde delaminasyon, fiber kırılma ve fiber kopmaları ortaya çıkmıştır. 8,66 mm hücre çapına sahip bal peteği çekirdek yapıda çökme, ezilme ve burkulma gözlenmiştir. Saf ve %0,2 ÇCKNT katkılı numunelerde üst kompozit yüzey ve altıgen çekirdek yapıda hasar alanında delaminasyon ve fiber kırılmalarıyla birlikte daha yoğun hasar göze çarpmaktadır. Yük-zaman grafiklerinden de anlaşıldığı üzere darbe süresinin uzaması girinim ve sehimi artırarak daha fazla hasar oluşmasına neden olmuştur. Şekil 8'de %0,1 ÇCKNT katkılı numunede hasarın daha az olduğu görülmektedir. %0,1 ÇCKNT ilavesinin darbe bölgesinde daha fazla yapıştırıcı yüzey alanı [10] ve bununla birlikte daha fazla hücre yoğunluğu [36] sağladığını ve bu yolla darbe direncini iyileştirdiği söylenebilir. Aynı zamanda poliüretan yapıştırıcıya %0,1 ÇCKNT ilavesinin sandviç panelin yapısal bütünlüğünü ve rijitliğini artırma konusunda etkili olduğu söylenebilir. Fakat %0,1'den daha fazla ÇCKNT ilavesinin %0,2 ÇCKNT'li numunelerde olduğu gibi saf numuneye kıyasla maksimum darbe kuvveti değerini düşürebileceği gözlemlenmiştir.



Şekil 8. Saf yapıştırıcılı numunenin üst yüzey ve kesit görüntüleri



Şekil 9. %0,1 ÇCKNT katkılı numunenin üst yüzey ve kesit görüntüleri



Şekil 10. %0,2 ÇCKNT katkılı numunenin üst yüzey ve kesit görüntüleri

5. SONUÇ VE ÖNERİLER (CONCLUSION AND RECOMMENDATIONS)

Bu çalışma kapsamında cam fiber takviyeli kompozit yüzeye ve alüminyum çekirdeğe sahip sandviç paneller; üç farklı yapıştırıcı (saf, %0,1 ÇCKNT ve %0,2 ÇCKNT katkılı) ve 8,86 mm hücre çapında çekirdek kullanarak üretildi. Sandviç yapılar ASTM 7136 standardına göre tasarlanmış bir test

düzeninde 50 J ilk enerji seviyesinde düşük hızlı darbe testleri uygulandı. Numuneler yük-zaman, yük-sehim ve enerji-zaman davranışları açısından analiz edildi. Sandviç panellerin deformasyon ve hasar özelliklerini incelemek için optik görüntülerden faydalanıldı. Yapılan deneysel çalışmadan aşağıdaki sonuçlar elde edildi:

1. Yük-zaman, yük-sehim ve enerji-zaman grafikleri düşük hızlı darbe sonucu oluşan hasarın değerlendirilmesi için yeterli veri sağlamıştır. %0,1 ÇCKNT takviyeli sandviç panellerde saf poliüretan yapıştırıcı kullanılarak üretilmiş olanlara göre yaklaşık %3 oranda daha yüksek maksimum temas kuvvetleri ortaya çıkmıştır.

2. Hasar analizleri, ÇCKNT ile takviye edilmiş poliüretan yapıştırıcı numunelerde saf numunelere göre hasar alanının daha dar olduğunu göstermiştir. 50 J enerji seviyesinde uygulanan darbe testleri sonrası numunelerde belirgin bir hasar oluşmuştur. Yüksek ağırlıklı vurucu nedeniyle absorbe edilen enerji değerleri bütün numuneler için birbirine yakın olarak tespit edilmiştir.

3. Darbe testi uygulanmış numunelerin üst yüzey ve kesitlerinin incelenmesi sonucunda CFTK'de fiber kırılması ve kopması, bal peteği çekirdekte ezilme ve çökme gözlemlenmiştir. ÇCKNT katkısının poliüretan yapıştırıcılarda hücre yoğunluğu artırmış buda sandviç panellerin darbe mukavemetinde artışla sonuçlanmıştır.

4. Cam fiber takviyeli kompozit yüzey alüminyum bal peteği çekirdeğe sahip sandviç panellerin düşük hızlı darbe performansı %0,1 ÇCKNT takviyesi ile artırılabilir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Atık cam fiber prepreg kumaşların hibesi konusundaki desteği için Kordsa A.Ş.'ye teşekkür ederim. Bununla birlikte, bal peteği yapıların temini ve sandviç panellerin üretimindeki destekleri için Altıgen Uzay Havacılık Gemi İnş. Panel Ve San. Tic. Ltd. Şti.'ye şükranlarımı sunarım. Ayrıca laboratuvar imkânlarını kullanmama izin verdiği için Prof. Dr. Mesut Uyaner'e teşekkürlerimi sunmayı borç bilirim.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] M.O. Kaman, M.Y. Solmaz, K. Turan, Experimental and numerical analysis of critical buckling load of honeycomb sandwich panels, *J. Compos. Mater.* 44 (2010) 2819–2831. <https://doi.org/10.1177/0021998310371541>.
- [2] M. Aslan, O. Güler, Ü. Alver, The Investigation of the Mechanical Properties of Sandwich Panel Composites with Different Surface and Core Materials, *Pamukkale Univ. J. Eng. Sci.* 24 (2018) 1062–1068. <https://doi.org/10.5505/pajes.2018.37605>.
- [3] A. GÜNÖZ, Y. KEPİR, M. KARA, the Investigation of Hardness Properties of Gfrp Composite Pipes Under Seawater Conditions, *Turkish J. Eng.* 6 (2020) 34–39. <https://doi.org/10.31127/tuje.775536>.
- [4] Y. KEPİR, A. GÜNÖZ, M. KARA, Repairing of damaged composite materials and self-healing composites, *Turkish J. Eng.* 6 (2021) 149–155. <https://doi.org/10.31127/tuje.866955>.
- [5] V. Birman, G.A. Kardomateas, Review of current trends in research and applications of sandwich structures, *Compos. Part B Eng.* 142 (2018) 221–240. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.01.027>.
- [6] G.B. Chai, S. Zhu, A review of low-velocity impact on sandwich structures, in: *Proc. Inst. Mech. Eng. Part L J. Mater. Des. Appl.*, 2011: pp. 207–230. <https://doi.org/10.1177/1464420711409985>.
- [7] T. TOPKAYA, Cıvata ile Birleştirilmiş Sandviç Kompozitlerin Bağlantı Mukavemetinin Karbon Fiber Takviye Kullanılarak Arttırılması, *Gazi Üniversitesi Fen Bilim. Derg. Part C Tasarım ve Teknol.* 8 (2020) 996–1004. <https://doi.org/10.29109/gujsc.804147>.
- [8] S. Georgiadis, A.J. Gunnion, R.S. Thomson, B.K. Cartwright, Bird-strike simulation for certification of the Boeing 787 composite moveable trailing edge, *Compos. Struct.* 86 (2008) 258–268. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2008.03.025>.
- [9] C. Caglayan, I. Osken, A. Ataalp, H.S. Turkmen, H. Cebeci, Impact response of shear thickening

- fluid filled polyurethane foam core sandwich composites, *Compos. Struct.* 243 (2020) 112171. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112171>.
- [10] L. Uğur, H. Duzcukoglu, O.S. Sahin, H. Akkuş, Investigation of impact force on aluminium honeycomb structures by finite element analysis, *J. Sandw. Struct. Mater.* 22 (2020) 87–103. <https://doi.org/10.1177/1099636217733235>.
- [11] X. Zhang, F. Xu, Y. Zang, W. Feng, Experimental and numerical investigation on damage behavior of honeycomb sandwich panel subjected to low-velocity impact, *Compos. Struct.* 236 (2020) 111882. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.111882>.
- [12] X. Wu, H. Yu, L. Guo, L. Zhang, X. Sun, Z. Chai, Experimental and numerical investigation of static and fatigue behaviors of composites honeycomb sandwich structure, *Compos. Struct.* 213 (2019) 165–172. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.01.081>.
- [13] M. Shifa, F. Tariq, A.D. Chandio, Mechanical and electrical properties of hybrid honeycomb sandwich structure for spacecraft structural applications, *J. Sandw. Struct. Mater.* (2019). <https://doi.org/10.1177/1099636219830783>.
- [14] J. Wang, C. Shi, N. Yang, H. Sun, Y. Liu, B. Song, Strength, stiffness, and panel peeling strength of carbon fiber-reinforced composite sandwich structures with aluminum honeycomb cores for vehicle body, *Compos. Struct.* 184 (2018) 1189–1196. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.10.038>.
- [15] K. Mehar, S.K. Panda, A. Dehengia, V.R. Kar, Vibration analysis of functionally graded carbon nanotube reinforced composite plate in thermal environment, *J. Sandw. Struct. Mater.* 18 (2016) 151–173. <https://doi.org/10.1177/1099636215613324>.
- [16] S. Belouettar, A. Abbadi, Z. Azari, R. Belouettar, P. Freres, Experimental investigation of static and fatigue behaviour of composites honeycomb materials using four point bending tests, *Compos. Struct.* 87 (2009) 265–273. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2008.01.015>.
- [17] M. Sadeghi, M.H. Pol, Investigation of behaviors of glass/epoxy laminate composites reinforced with carbon nanotubes under quasi-static punch shear loading, *J. Sandw. Struct. Mater.* 21 (2019) 1535–1556. <https://doi.org/10.1177/1099636217719223>.
- [18] A.S. Sayyad, Y.M. Ghugal, Bending, buckling and free vibration of laminated composite and sandwich beams: A critical review of literature, *Compos. Struct.* 171 (2017) 486–504. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.03.053>.
- [19] E. Burgaz, C. Kendirlioglu, Thermomechanical behavior and thermal stability of polyurethane rigid nanocomposite foams containing binary nanoparticle mixtures, *Polym. Test.* 77 (2019) 105930. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2019.105930>.
- [20] E. Burgaz, *Polyurethane Insulation Foams for Energy and Sustainability*, 2019.
- [21] G. Otorugust, H. Dodiuk, S. Kenig, R. Tenne, Important insights into polyurethane nanocomposite-adhesives; a comparative study between INT-WS2 and CNT, *Eur. Polym. J.* 89 (2017) 281–300. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2017.02.027>.
- [22] A. Gunoz, Y. Kepir, M. Kara, Tensile Strength Alteration of GFRP Composite Pipes Under Seawater-Dominated Conditions, *J. Fail. Anal. Prev.* 20 (2020) 1426–1430. <https://doi.org/10.1007/s11668-020-00962-2>.
- [23] G. Zhou, M.D. Hill, Impact damage and energy-absorbing characteristics and residual in-plane compressive strength of honeycomb sandwich panels, *J. Sandw. Struct. Mater.* 11 (2009) 329–356. <https://doi.org/10.1177/1099636209105704>.
- [24] Y.M. Jen, L.Y. Chang, Effect of thickness of face sheet on the bending fatigue strength of aluminum honeycomb sandwich beams, *Eng. Fail. Anal.* 16 (2009) 1282–1293. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2008.08.004>.
- [25] Y.M. Jen, C.W. Ko, H. Bin Lin, Effect of the amount of adhesive on the bending fatigue strength of adhesively bonded aluminum honeycomb sandwich beams, *Int. J. Fatigue.* 31 (2009) 455–462. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2008.07.008>.
- [26] A. Kaboorani, B. Riedl, Nano-aluminum oxide as a reinforcing material for thermoplastic adhesives, *J. Ind. Eng. Chem.* 18 (2012) 1076–1081. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2011.12.001>.

- [27] H. Akkus, H. Duzcukoglu, O.S. Sahin, Experimental research and use of finite elements method on mechanical behaviors of honeycomb structures assembled with epoxy-based adhesives reinforced with nanoparticles, *J. Mech. Sci. Technol.* 31 (2017) 165–170. <https://doi.org/10.1007/s12206-016-1216-0>.
- [28] G. Otorgust, H. Dodiuk, S. Kenig, R. Tenne, Important insights into polyurethane nanocomposite-adhesives; a comparative study between INT-WS2 and CNT, *Eur. Polym. J.* 89 (2017) 281–300. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2017.02.027>.
- [29] A. Tounici, J.M. Martín-Martínez, Addition of small amounts of graphene oxide in the polyol during the synthesis of waterborne polyurethane urea adhesives for improving their adhesion properties, *Int. J. Adhes. Adhes.* 104 (2021) 102725. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2020.102725>.
- [30] A. Gunoz, Y. Kepir, M. Kara, Effect of hydrothermal aging on the mechanical properties of nanocomposite pipes, *Mater. Test.* 63 (2021) 253–258. <https://doi.org/10.1515/mt-2020-0037>.
- [31] H. Sepetcioglu, A. Gunoz, M. Kara, Effect of hydrothermal ageing on the mechanical behaviour of graphene nanoplatelets reinforced basalt fibre epoxy composite pipes, *Polym. Polym. Compos.* (2021). <https://doi.org/10.1177/0967391121992939>.
- [32] M.E. Kabir, M.C. Saha, S. Jeelani, Effect of ultrasound sonication in carbon nanofibers/polyurethane foam composite, *Mater. Sci. Eng. A.* 459 (2007) 111–116. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2007.01.031>.
- [33] M.C. Saha, M.E. Kabir, S. Jeelani, Enhancement in thermal and mechanical properties of polyurethane foam infused with nanoparticles, *Mater. Sci. Eng. A.* 479 (2008) 213–222. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2007.06.060>.
- [34] M. Uyaner, M. Kara, Dynamic response of laminated composites subjected to low-velocity impact, *J. Compos. Mater.* 41 (2007) 2877–2896. <https://doi.org/10.1177/0021998307079971>.
- [35] A.A. Mohammed, M. V. Hosur, S. Jeelani, Processing and characterization of nanophased polyurethane foams, *Cell. Polym.* 25 (2006) 293–306. <https://doi.org/10.1177/026248930602500602>.
- [36] M.A. Bhuiyan, M.V. Hosur, S. Jeelani, Low-velocity impact response of sandwich composites with nanophased foam core and biaxial braided face sheets, *Compos. Part B Eng.* 40 (2009) 561–571. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2009.03.010>.