



## The effect of core height on energy absorbing capacity in aluminum corrugated sandwich panels

Cenk Kılıçaslan<sup>1\*</sup>, Mustafa Güden<sup>2</sup>

<sup>1</sup>R&D Manager, Norm Cıvata San. ve Tic. A.Ş., R&D Center, A.O.S.B, İzmir, 35620, Turkey

<sup>2</sup>Dynamic Testing and Modeling Laboratory, Department of Mechanical Engineering, İzmir Institute of Technology, İzmir, 35430, Turkey

### Highlights:

- Numerical and experimental impact testing trapezoidal corrugated core Al sandwiches
- A more homogeneous load distribution at the surface and a less pressure transferred to the backing plate with increasing fin height.
- Projector type and the orientation dependent specific energy absorption

### Keywords:

- Simulation
- Sandwiches
- Core
- Impact

### Article Info:

Research Article  
Received: : 05.09.2017  
Accepted: 08.08.2019

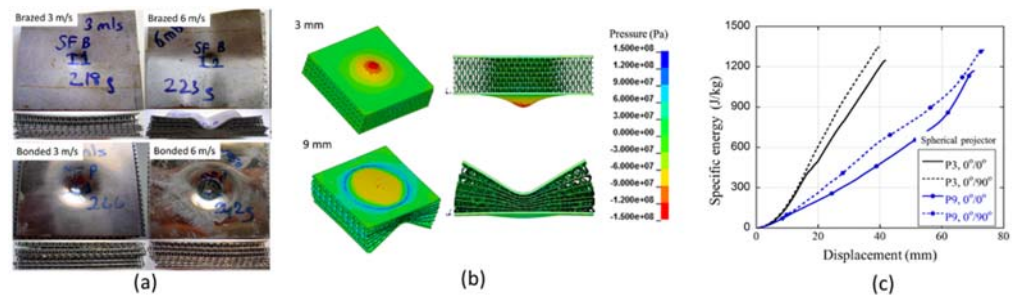
### DOI:

10.17341/gazimmfd.639834

### Correspondence:

Author: Cenk Kılıçaslan  
e-mail:  
cenk.kilicaslan@norm-  
fasteners.com.tr  
phone: +90 232 376 76 10

### Graphical/Tabular Abstract



**Figure A.** a) the deformed brazed and bonded samples tested at 3 m/s and 6 m/s, b) the numerical pressure at the backing plate of 3 mm and 9 mm-height fin sandwiches and c) specific energy absorption of 3 mm and 9 mm-height fin sandwiches tested with spherical projector

**Purpose:** In this study, the energy absorbing capacity of brazed and polyurethane adhesively bonded corrugated aluminum sandwich panels were investigated both experimentally and numerically.

### Theory and Methods:

In sandwich panels, Al 1050 H14 trapezoidal zig-zag corrugated cores and face and interlayer sheets were used. Each sandwich panel has core orientation of 0°/0° or 0°/90°. The cores used in these panels were smaller, core height is about 3 mm, in contrast to conventional sandwich cores. Impact tests were conducted at 3 and 6 m/s with spherical projectors. Adhesively bonded sandwich panels were also tested at 6 m/s with flat and conical projectors. Numerical models were prepared in LS-DYNA to investigate the deformation behavior of cores.

### Results:

Panels tested with flat and conical projectors experienced complete perforation and absorbed more energy at configuration of 0°/0° core orientation. However, panels tested with spherical projectors were not perforated and they absorbed more energy at configuration of 0°/90° core orientation. Energy absorbing capacity of the panels were also compared to the panels having 9 mm height corrugated cores. The results showed that effective collapsing length was seen to increase due to increase in core height and impact energy distributed the whole panel surface more homogenous manner.

### Conclusion:

As the fin height increased a more homogeneous load distribution was found numerically at the surface of sandwiches and less pressure was transferred to the backing. The specific energy absorption behavior of the sandwich panels was affected by the projector type and the orientation of the fin layers. For that, special sandwich panel design should be performed for the type of the applications.



## Oluklu alüminyum sandviç panellerde kor yüksekliğinin enerji sönmleme kapasitesine olan etkisi

Cenk Kılıçaslan\*<sup>1</sup>, Mustafa Güden<sup>2</sup>

<sup>1</sup>İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Makine Mühendisliği Bölümü, Dinamik Test ve Modelleme Lab., Urla, İzmir, Türkiye

<sup>2</sup>İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Makine Mühendisliği Bölümü, Urla, İzmir, Türkiye

### Ö N E Ç I K A N L A R

- Yamuk oluklu Al sandviç yapıların numerik ve deneysel darbe testi
- Fin yüksekliğinin artması ile yüzey plakada daha homojen yük dağılımı ve arka plakaya iletilen daha az basınç
- Projektör çeşidi ve fin oryantasyonu ile değişen spesifik enerji emme

#### Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 05.09.2017

Kabul: 08.08.2019

DOI:

10.17341/gazimmfd.639834

#### Anahtar Kelimeler:

Simülasyon,  
sandviç,  
kor,  
darbe

#### ÖZET

Bu çalışmada, sert lehim ve poliüretan ile birleştirilmiş oluklu kora sahip alüminyum sandviç yapıların enerji sönmleme kapasiteleri incelenmiştir. Sandviç yapılarda kor olarak yamuk ikizkenar şeklinde zikzak 1050 H14 Al alaşımından yapılmış olan oluklu katmanlar ile yüz ve ara plakalar kullanılmıştır. Her bir sandviç panel, 0°/0° veya 0°/90° kor oryantasyonuna sahiptir. Çalışmada kullanılan oluklu korlar geleneksel oluklu korlara kıyasla daha küçüktür ve 3 mm yüksekliğe sahiptir. Darbe testleri 3 ve 6 m/s hızlarında küresel projektörler ile gerçekleştirilmiştir. Poliüretan ile birleştirilmiş sandviç yapıların bir kısmı ayrıca 6 m/s darbe hızında düz ve konik projektörler ile test edilmiştir. Oluklu korların deformasyon tipinin belirlenmesi amacıyla deneyin nümerik simülasyonu LS-DYNA programı ile oluşturulmuştur. Düz ve konik projektörler ile test edilen paneller tamamen delinmiştir ve 0°/0° kor oryantasyonunda daha çok enerji sönmlemiştir. Küresel projektörler ile test edilen paneller ise delinmemiştir ve enerji sönmleme değerleri 0°/90° kor oryantasyonunda daha yüksektir. Panellerin enerji sönmleme kapasiteleri aynı şekle sahip ancak 9 mm yüksekliğindeki oluklu korlu sandviç paneller ile karşılaştırılmıştır. Çalışma sonunda kor yüksekliğinin artması ile efektif ezilme uzunluğunun arttığı ve darbe enerjisinin panele daha homojen olarak dağıtıldığı görülmüştür.

## The effect of core height on energy absorbing capacity in aluminum corrugated sandwich panels

### H I G H L I G H T S

- Numerical and experimental impact test of trapezoidal corrugated Al sandwich structures
- More homogenous force distribution and less transmitted back plate face pressure with increasing fin height
- Specific energy absorbtion which is varied according to projector type and fin orientation

#### Article Info

Research Article

Received: 05.09.2017

Accepted: 08.08.2019

DOI:

10.17341/gazimmfd.639834

#### Keywords:

Simulation,  
sandwich,  
core,  
impact

#### ABSTRACT

In this study, energy absorbing capacity of brazed and polyurethane adhesively bonded corrugated aluminum sandwich panels were investigated. In sandwich panels, Al 1050 H14 trapezoidal zig-zag corrugated cores and face and interlayer sheets were used. Each sandwich panel has core orientation of 0°/0° or 0°/90°. The cores used in these panels were smaller, core height is about 3 mm, in contrast to conventional sandwich cores. Impact tests were conducted at 3 and 6 m/s with spherical projectors. Adhesively bonded sandwich panels were also tested at 6 m/s with flat and conical projectors. Numerical models were prepared in LS-DYNA to investigated the deformation behavior of cores. Panels tested with flat and conical projectors experienced complete perforation and absorbed more energy at configuration of 0°/0° core orientation. However, panels tested with spherical projectors were not perforated and they absorbed more energy at configuration of 0°/90° core orientation. Energy absorbing capacity of the panels were also compared to the panels having 9 mm height corrugated cores. The results showed that effective collapsing length was seen to increase due to increase in core height and impact energy distributed the whole panel surface more homogenous manner.

\*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: cenk.kilicaslan@norm-fasteners.com.tr, mustafaguden@iyte.edu.tr / Tel: +90 232 376 7610

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Sandviç paneller yüksek dayanım-ağırlık oranları ve enerji sönmleme kapasitelerinden dolayı havacılık ve savunma sanayinde yoğun olarak kullanılmaktadırlar. Sandviç panellerde yüz plakaları ve kor yapıları kompozit ya da metal gibi farklı malzemelerden seçilmekte olup yapının mekanik özelliklerini doğrudan etkilemektedir. Korlar genellikle hafiflikleri ve yüksek deformasyon kapasitelerinden dolayı köpük, bal-peteği veya oluklu gibi hücreli yapılardan seçilmektedir. Hem alüminyum köpük [1-7] ve hem de bal-peteği [8-12] kor ve korlu sandviç yapıların statik ve dinamik mekanik özelliklerine yönelik literatürde oldukça fazla çalışma mevcuttur ve bunların bazıları kaynakça'da görülebilir. Bal peteği homojen hücre yapısından dolayı havacılık endüstrisinde en yaygın kullanılan hücresel yapıdır [13]. Oluklu yapıların mekanik performansları alüminyum köpük ve bal-peteklerine oldukça yakın olan nispeten yeni yapılardır. Üretim yöntemi metal köpüklere ve bal-peteği yapılara göre çok daha kolay ve homojen hücre yapısına sahiptir [14]. En çok çalışılan şekilleri şunlardır; V-tipi [15, 16], U-tipi [17, 18], X-tipi (diamond) [19] ve Y-tipi [16, 20, 21]. Wadley [22] farklı periyodik oluklu korların basma ükleme altındaki ezilme dayanımının açık hücreli alüminyum köpükler ile bal-peteği yapılarının arasında olduğunu göstermiştir. Radford vd.[14] alüminyum köpük mermiler kullanarak paslanmaz çelikten yapılan üçgen oluklu ve piramit çubuk korlu sandviç plakalar ile aynı kütleyle sahip çelik plakalar üzerinde çarpışma testleri gerçekleştirmiş ve sandviç plakalarda meydana gelen çökme miktarının tüm çarpışma hızlarında çelik plakalardan daha az olduğunu göstermiştir. Zhang vd. [23] kaynak ile birleştirilmiş ve çelikten yapılmış V, U, X ve Y şeklindeki oluklu korların arasında en yüksek ezilme direnci ve enerji sönmleme değeri V şeklindeki oluklu korda olduğunu gösterdi. Hou vd. [24] 2024 Al malzemesinden yapılmış olan ikizkenar ve üçgen şeklindeki oluklu sandviç panellerin düşük hızlı darbe davranışlarını incelemişlerdir. Sandviç paneller düşük darbe hızında hem lokalize hem de global olarak ezilmişlerdir. Lokalize darbe koşullarında kor şeklinin darbe direncine kayda değer bir etkisinin olmadığı, global ezilme koşullarında ise kor şeklinin çok etkili olduğu görülmüştür. Rejab vd. [25] 2024-0 Al, cam fiber/plastik (GFRP) ve karbon fiber/plastik (CFRP) malzemelerinden yapılmış üçgen oluklu sandviç yapıların ezilme davranışlarını incelemişlerdir. En yüksek ezilme direnci CFRP kompozit malzemesinden yapılan oluklu sandviçlerde görülmüştür.

Genel olarak hücresel yapılarda örneğin alüminyum bal peteği, köpük ve katmanlı oluklu yapılarda darbe hızına bağlı olarak 3 farklı deformasyon gözlenmektedir. Bunlar düşük hızlarda yarı-statik deformasyon, orta hızlarda geçiş deformasyonu ve yüksek hızlarda ise şok (inertia) deformasyonudur [26]. Alüminyum bal peteği üzerine yapılan çalışmalarda geçiş deformasyon hızlarının boyuta bağlı olarak değiştiği ve 10 m/s üzeri belirlenmiştir [27, 28]. Sarıkaya vd. [29], Odacı vd.[30] ve Kılıçaslan vd.[31] katmanlı zig-zag 1050 Al oluklu yapılarda farklı darbe

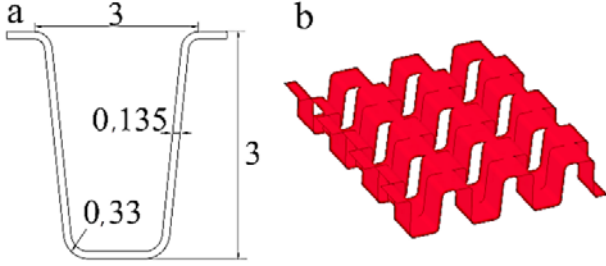
yüklerine karşı oluşan gerilmeleri deneysel ve numerik yöntemlerle belirlemişlerdir. Geçiş ve şok deformasyon hızları sırası ile yaklaşık 20 ve 90 m/s olarak belirlenmiştir. Çok katmanlı 1060-Al oluklu yapılarda 9 m/s hızında yarı-statik denge deformasyonu belirlenirken, 38 m/s hızda şok gerilme bölgesine geçiş deformasyonu belirlenmiştir [27, 28]. Literatürde oluklu yapılar üzerinde yapılan diğer çalışmalarda da ataletin etkin olduğu yüksek hızlar kullanılmıştır [3, 27, 28, 30, 32-34]. Bu çalışmada sert lehim ve poliüretan ile birleştirilmiş oluklu kora sahip alüminyum sandviç yapıların enerji sönmleme kapasiteleri ve oluklu kor yüksekliğinin enerji sönmleme kapasitesine olan etkisi nispeten düşük hızlarda incelenmiştir. Bu amaçla çok katmanlı oluklu alüminyum sandviç yapılar lokalize olarak ezilerek test edilmiştir. Literatürde çalışılan oluklu kor yüksekliği genellikle 7 ile 15 mm arasındadır ve yalnızca birkaç çalışmada çok katmanlı oluklu kor kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan kor yapısı ısı transferi amacıyla kullanılmaktadır ve yüksekliği 3 mm'dir. Ayrıca diğer kordardan farklı olarak zikzak yapıdadır. Darbe testlerinin bir kısmı 3 ve 6 m/s gibi ataletin çok daha az etkin olduğu hızlarında küresel projektör kullanılarak sert lehim ve poliüretan ile birleştirilmiş sandviçler üzerinde gerçekleştirilirken, diğer bir kısmı sadece poliüretan ile bileştirilmiş yapılarda 6 m/s hızlarında düz ve konik projektörler ile gerçekleştirilmiştir. Kor oryantasyonun enerji sönmleme kapasitesine olan etkisini görebilmek amacıyla bir kısım sandviç panelde 0°/90° kor oryantasyonu kullanılmıştır. Üç milimetre kor yüksekliğine sahip sandviç panellerin enerji sönmleme değerleri yazarın önceki çalışmasında [35] verilen ve 9 mm kor yüksekliğine sahip sandviç paneller ile karşılaştırılmıştır.

## 2. YAPILAR VE DENEYLER (STRUCTURES AND EXPERIMENTS)

Sandviç yapılar, 7 adet oluklu kor, 6 adet ara plaka ve 2 adet yüz plakasından oluşmaktadır. Ara plaklar ve korlar 1050 H14 Al, sert lehimli panellerin yüz plakaları 3003 Al, poliüretan ile bileştirilen panellerin yüz plakaları ise 1050 H14 Al malzemesinden üretilmiştir. Bir birim oluklu korun yüksekliği ve genişliği 3 mm, kalınlığı ise 0,135 mm'dir (Şekil 1a). Oluklu kor katmanı Şekil 1b'de gösterildiği şekilde zikzaklı yapıya sahiptir. Bir kısım sandviç panel 600°C'de 4343 Al doldurucu ile 10 dakika boyunca fırınlanmış, doldurucu malzeme eriyerek panel bileşenlerinin birleşmesini sağlamıştır. Bir kısım sandviç panel ise oda sıcaklığında poliüretan yapıştırıcı kullanılarak birleştirilmiştir. Poliüretan ile birleştirilen panellerde 0°/0° ve 0°/90° kor oryantasyonu kullanılmıştır. Tüm sandviç paneller 100x100x30 mm<sup>3</sup> ölçüsündedir ve 0,75 g cm<sup>-3</sup> özgül ağırlığa sahiptir.

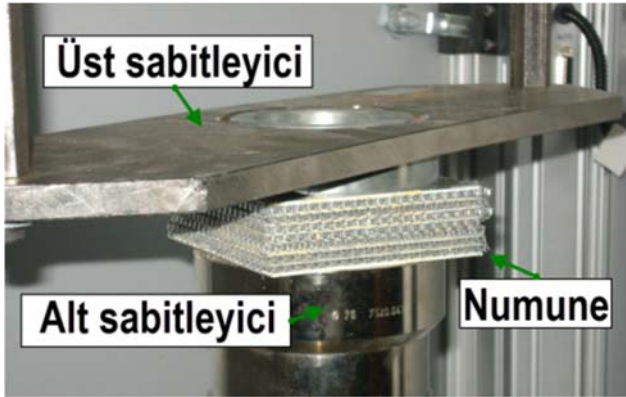
1050 H14 Al ve 3003 Al malzemesinin gerilme-gerinim eğrileri yarı statik deformasyon hızına tekabül eden 10<sup>-3</sup>/s deformasyon hızında yapılan çekme deneyleri ile belirlenmiştir. Sert lehimleme sırasında malzemelerin gördüğü ısıl etkinin mekanik değerlere olan etkisini görmek

amacıyla bir kısım çekme numunesi aynı şartlara tabi tutulmuş ve daha sonra test edilmişlerdir.



**Şekil 1.** a) Birim kor ölçüleri ve b) kor katmanı.  
(a) Unit cell dimensions and (b) corrugated layer.)

Darbe testleri FRACTOVIS düşen ağırlık test cihazında gerçekleştirilmiştir. Testten önce sandviç panel üst ve alt sabitleyiciler arasında konmaktadır ve üst sabitleyici panelin test sırasında hareket etmesini engellemek için panel yüzeyine basma kuvveti uygulamaktadır (Şekil 2). Bu kuvvet oluklu korların ezilmemesi için düşük tutulmalıdır ve bu çalışmada 20 N sabitleme kuvveti kullanılmıştır. Sistemin darbe kütlesi toplam 16 kg'dır. Testlerde küresel, düz ve konik projektörler kullanılmıştır. İlk darbe testleri 3 ve 6 m/s darbe hızlarında küresel projektörler ile sert lehim ve poliüretan ile birleştirilmiş sandviç paneller üzerinde, daha sonraki testler ise poliüretan ile birleştirilmiş 0°/0° ve 0°/90° kor oryantasyonlu (Şekil 3a ve Şekil 3b) paneller üzerinde 6 m/s darbe hızında düz ve konik projektörler ile gerçekleştirilmiştir.

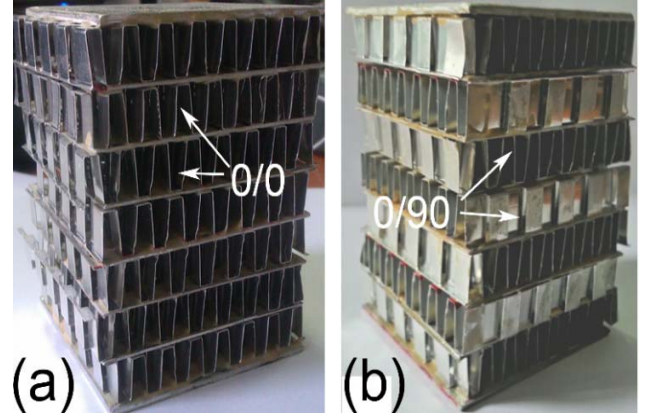


**Şekil 2.** Düşen ağırlık test cihazı numune sabitleme sistemi.  
(Drop-weight test sample fixture system.)

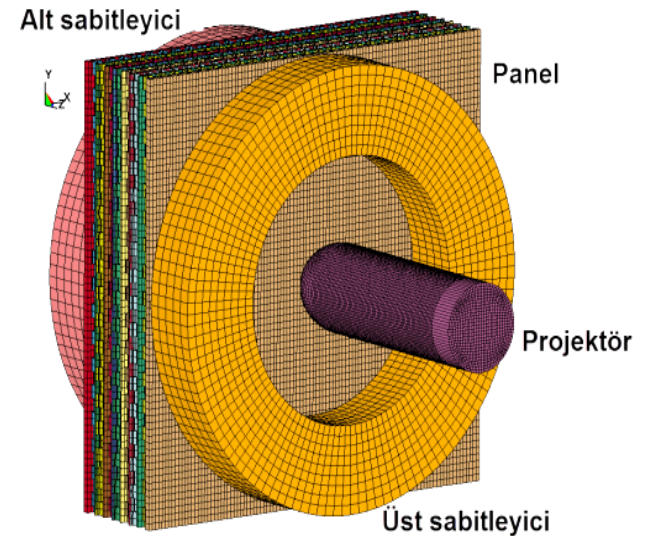
### 3. NÜMERİK MODEL (NUMERICAL MODELS)

Oluklu korların deformasyon davranışlarının belirlenmesi amacıyla, poliüretan ile birleştirilmiş ve küresel projektör ile 6 m/s hızında test edilen sandviç panelin üç boyutlu nümerik modeli LS-DYNA programı ile oluşturulmuştur. Oluşturulan sonlu elemanlar modeli projektör, sandviç panel ve üst/alt sabitleyicilerden oluşmaktadır (Şekil 4). Kor tabakaları iki integrasyon noktalı Belytschko-Tsay kabuk elemanlarla, ara ve yüz plakaları ise dörtgen katı elemanlar ile modellenmiştir. Sandviç plaka toplam 54136 katı, 187599

kabuk eleman ihtiva etmektedir. 1050 H14 ve 3003 Al malzemelerinin anlık akma gerilmesi MAT\_SIMPLIFIED\_JOHNSON\_COOK malzeme modeli ile modellenirken, sabitleyiciler ve projektör için rijit kabulü yapılmıştır. Deneyde panel üzerine etki eden sabitleme kuvveti programda LOAD\_SET\_SEGMENT kartı kullanılarak tanımlanmıştır. Panel bileşenlerinin birbirlerine mükemmel şekilde bağlandığı kabulü yapılmıştır. Panel ile projektör arasında ERODING\_SURFACE\_TO\_SURFACE, sabitleyiciler ile panel arasında, AUTOMATIC\_SURFACE\_TO\_SURFACE ve panelin kendi bileşenleri arasında ERODING\_SINGLE\_SURFACE kontak tipi kullanılmıştır. Her bir kontak tanımında statik ve dinamik sürtünme katsayıları 0,3 ve 0,2 olarak alınmıştır. Nümerik modelin doğruluğunun artırılması amacı ile yüksek sayıda eleman kullanılmıştır ve bu çözüm süresinin çok yüksek olmasına sebep olmaktadır (800 CPU saati). Çözüm süresini kısaltmak amacıyla modelde kütle orantılama metodu kullanılmıştır.



**Şekil 3.** Poliüretan ile birleştirilmiş panellerde (a) 0°/0° ve (b) 0°/90° kor oryantasyonu.  
(The core orientations in polyurethane bonded panels: (a) 0°/0° and (b) 0°/90°.)



**Şekil 4.** Düşen ağırlık testinin nümerik modeli.  
(Drop-weight test numerical model.)

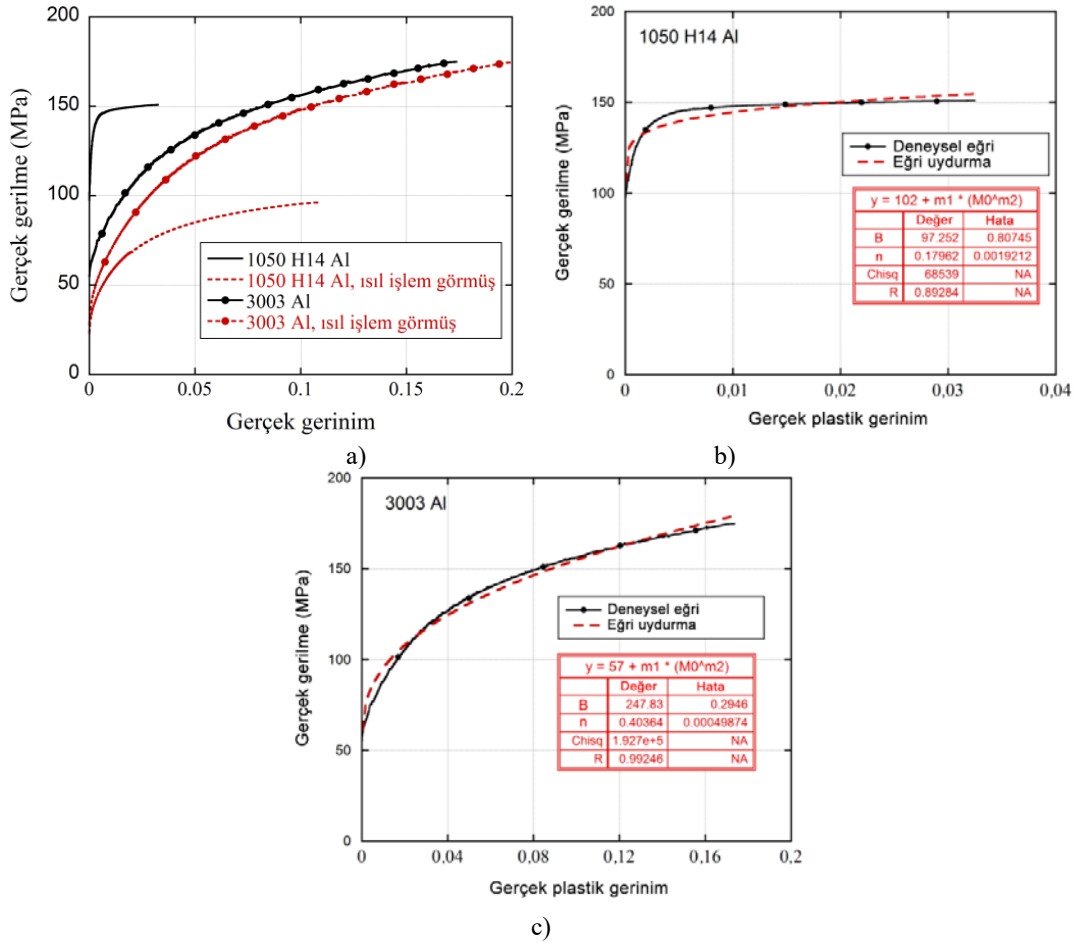
#### 4. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

1050 H14 Al ve 3003 Al malzemelerinin çekme gerilme-gerinim eğrileri Şekil 5a'da verilmiştir. Standart 1050 H14 Al ve 3003 Al malzemelerinin akma gerilme değerleri sırası ile 102 MPa ile 57 MPa olarak bulunmuştur. Malzemelerin elastik modülleri ise 70 ve 69 GPa'dır. Simülasyonlarda kullanılmak üzere 1050 H14 ve 3003 Al malzemelerinin çekme eğrileri kullanılarak Johnson-Cook malzeme modeli katsayıları belirlenmiştir. Şekil 5b ve Şekil 5c'de sırası ile 1050 H14 ve 3003 alaşımlarının gerçek gerilme-gerçek plastik gerinim eğrilerine Johnson-Cook denkleminin uydurulması gösterilmiştir. Bu şekilde denkleme ait A, B ve n katsayıları belirlenmiştir.

Şekil 6a-Şekil 6d'de test edilen sert lehim ve poliüretan ile birleştirilmiş panellerin ön ve üst kısımlarında oluşan deformasyon gösterilmiştir. Sert lehimli paneller özellikle çarpışma bölgesinde ağır deformasyona uğramıştır. Üç m/s darbe hızında 5 adet kor katmanı ve ara plakalar ezilmiştir. (Şekil 6a). Altı m/s darbe hızında ise çarpışma enerjisi tüm

panel yüzeyine yayılmış ve panelin dört köşesinde lokalize çökmelere neden olmuştur(Şekil 6b). Sert lehimli panellerin hiçbiri delinmemiştir. Üç m/s darbe hızında test edilen panelin arka kısmında 4 mm, 6 m/s hızında test edilen panelin arka kısmında ise 10 mm çökme görülmüştür. Poliüretan ile birleştirilmiş panellerin ön-yüz plakaları her iki darbe hızında da delinmiştir (Şekil 6c ve Şekil 6d). Sert lehimli panellere kıyasla, yapılandırılan panellerin çarpışma alanından uzak olan kısımlarında deformasyon görülmemiştir. Üç m/s darbe hızında test edilen panelin arka kısmında 0,5 mm çökme görülürken, 6 m/s hızında test edilen panel tamamen delinmiş ve arka kısmı 7 mm çökmüştür. Nümerik model panelin arka kısmında meydana gelen çökme değerini 8 mm olarak vermiştir.

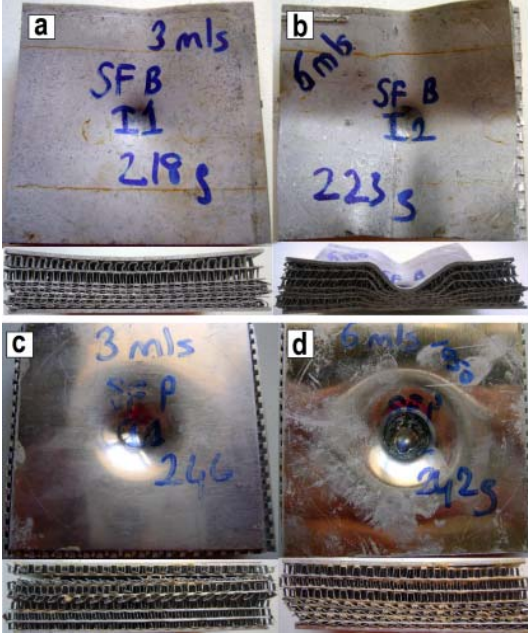
Şekil 7a-Şekil 7c'de nümerik model tarafından belirlenen deformasyon adımları gösterilmiştir. Kor katmanı ilk önce burkulmakta (Şekil 7a) daha sonra ezilmektedir (Şekil 7b). Yazarın geçmiş çalışmasında [35] belirtildiği üzere 9 mm yüksekliğe sahip korlar, küçük korlardan farklı olarak burkulmadan sonra eğilmeye maruz kalmaktadır. Bu korun enerji sönümleme özelliğini olumsuz etkilemektedir. Projektör ilerlemeye devam ettikçe yüz plakası delinmekte,



Şekil 5. a)1050 H14 Al ve 3003 Al malzemelerinin çekme gerilme-gerinim eğrileri ve Johnson-Cook formülünün eğrilere uydurulması b) 1050 H14 ve c) 3003 Al.

(The tensile stress-strain curves of 1050 H14 Al and 3003 Al and Johnson-Cook formulation fitting on the curves of (b) 1050 H14 and (c) 3003 Al.)

korlar ile birlikte ara plakalar da çökmeye başlamaktadır (Şekil 7c).

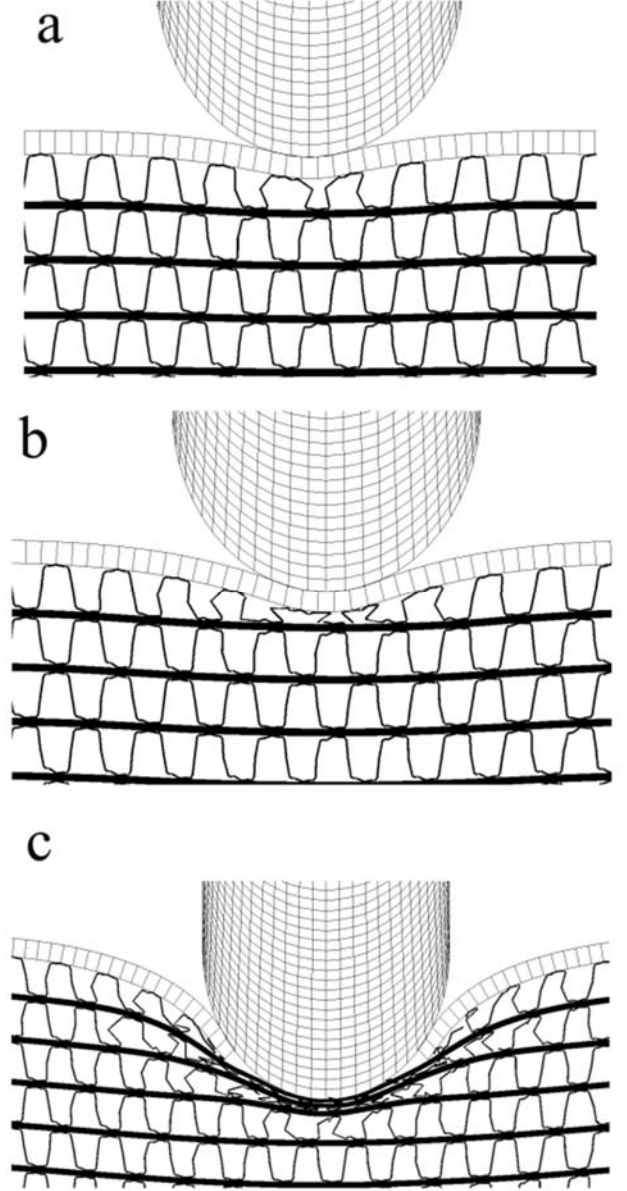


**Şekil 6.** Deforme olmuş sert lehimli paneller a)3 m/s ve b) 6 m/s ve yapıştırılan paneller c)3 m/s ve d) 6 m/s. (The deformed brazed (a)3 m/s and (b)6 m/s and bonded panels (c) 3 m/s and (d) 6 m/s.)

(Numerical model projectile deformation of the panel at the displacements of (a)1.5 mm (b) 3 mm and (c)10 mm. )

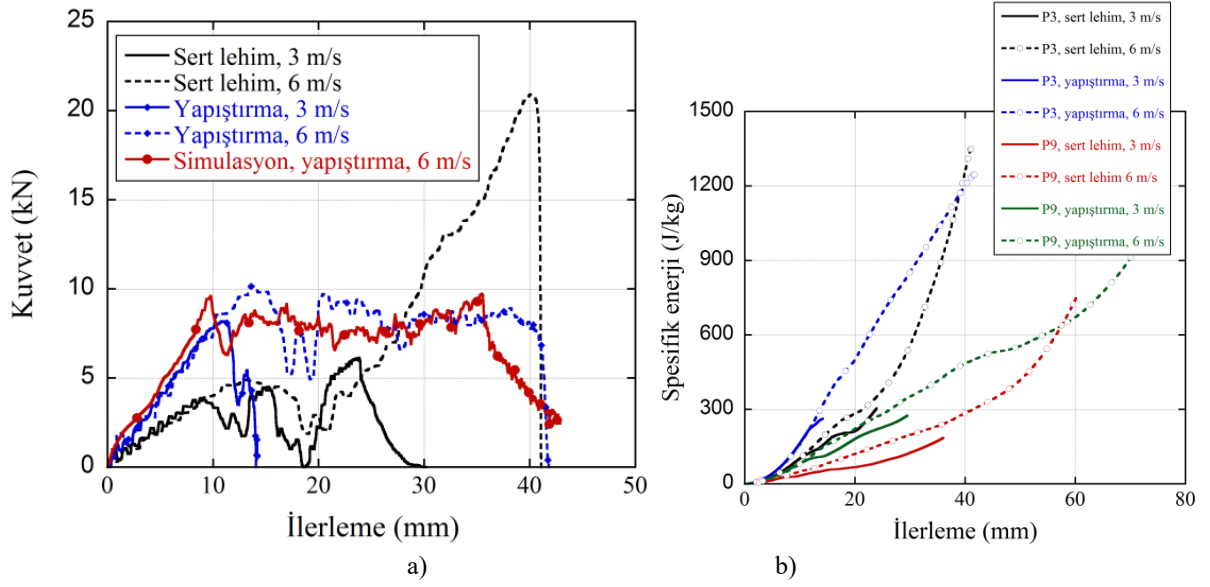
Şekil 8a’da panellerin kuvvet-ilerleme eğrileri ile nümerik model tarafından verilen eğri gösterilmektedir. Yapıştırılan paneller sert lehimli panellerden yaklaşık iki kat daha fazla kuvvet değerine sahiptir. Her iki darbe hızında sert lehimli panellerin kuvvet eğrilerinde ani düşüşler görülmektedir. Bunun nedeni bu panellerde meydana gelen ani ve ağır deformasyonlar ile panelin sabitleyiciler arasında hareket etmesi olabilir. Üç m/s darbe hızında yapıştırılmış panel darbe enerjisini yaklaşık 11 mm ilerleme değerinde sönmüştür. Altı m/s darbe hızındaki deneysel ve nümerik kuvvet-ilerleme eğrileri birbiri ile oldukça uyumludur. Deneysel eğride kuvvet maksimum noktaya ulaştıktan sonra 40 mm ilerleme değerine kadar neredeyse sabit kalmıştır. Deneysel eğride 19 mm ilerleme değerinde nümerik model sonucunda görülmeyen kuvvet düşüşleri görülmüştür. Bunun nedeni test sırasında panelin sabitleyiciler arasında hareket etmesidir. Üç mm (P3) ve 9 mm (P9) kor yüksekliğine sahip panellerin kütle başına düşen enerji (spesifik enerji)-ilerleme eğrileri Şekil 8b)’de verilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere P3 panelleri P9 panellerinden daha fazla enerji sönmüştür. Ancak yapılan simülasyonlar sonunda P9 panellerin darbe enerjisini P3 panellere kıyasla çok daha homojen şekilde tüm panele yayabildiği görülmüştür (Şekil 9a ve Şekil 9b). Bu panelin lokalize olarak ağır bir şekilde deforme olmasını engellemekte ve panelin arka yüzüne transfer edilen basınç miktarında azalmaya sebep olmaktadır. Şekil 8a ve Şekil 8b’de gösterildiği üzere P9 panelinin arka yüzüne iletilen basınç

60x10<sup>6</sup> Pa iken, P3 panelinde bu değer 150x10<sup>6</sup> Pa’dır. Ayrıca P9 panelinde bu basınç yaklaşık 2550 mm<sup>2</sup> alana etki ederken P3 panelinde 314 mm<sup>2</sup> alana etki etmektedir. Bu da P3 panellerinin koruma özelliğinin kötü yönde etkilenmesine neden olmaktadır.

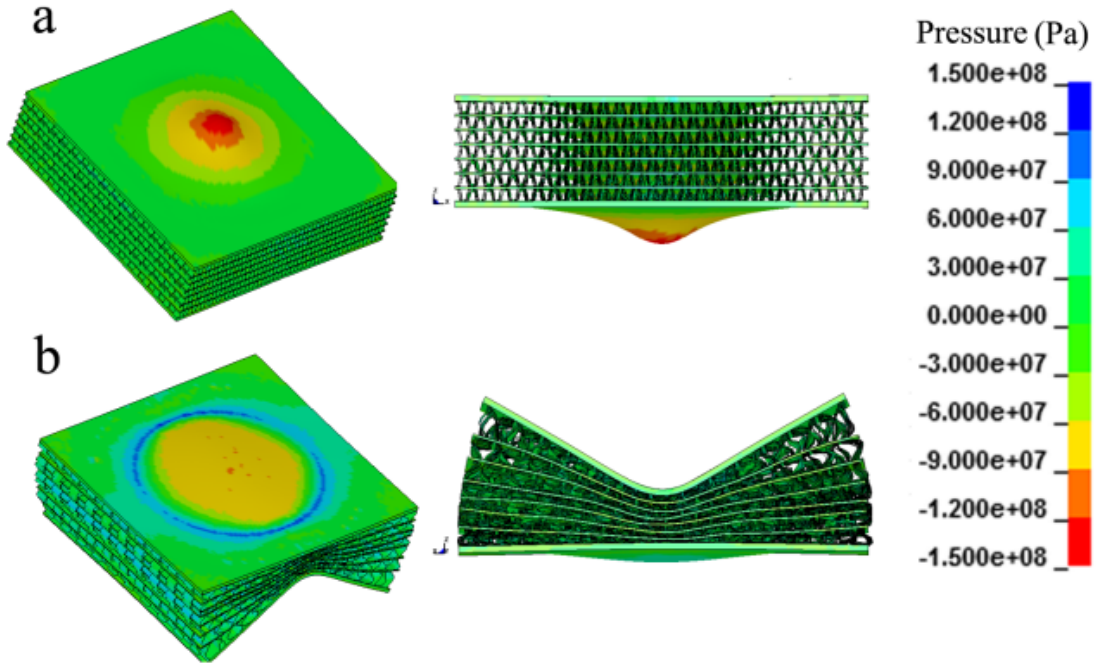


**Şekil 7.** Nümerik model tarafından verilen deformasyon adımları a) 1,5 mm b) 3 mm ve c)10 mm projektör ilerlemesinde.

Şekil 9a-Şekil 9c’de küresel, düz ve konik projektörler ile test edilen 0°/0° ve 0°/90° kor oryantasyonuna sahip P3 ve P9 panellerinin spesifik enerji-ilerleme eğrileri gösterilmektedir. Burada panellerin anlık enerji sönmüleme değerleri değil, darbe sonunda sönmüledikleri enerji miktarları göz önüne alınmıştır. P3 ile P9 panellerinin enerji sönmüleme değerleri küresel projektör ile gerçekleştirilen testler için birine yakındır. Düz projektörler ile



Şekil 8. a) Kuvvet-ilerleme ve b) spesifik enerji-ilerleme eğrileri.  
(a) Force-displacement and (b) specific energy-displacement curves.)

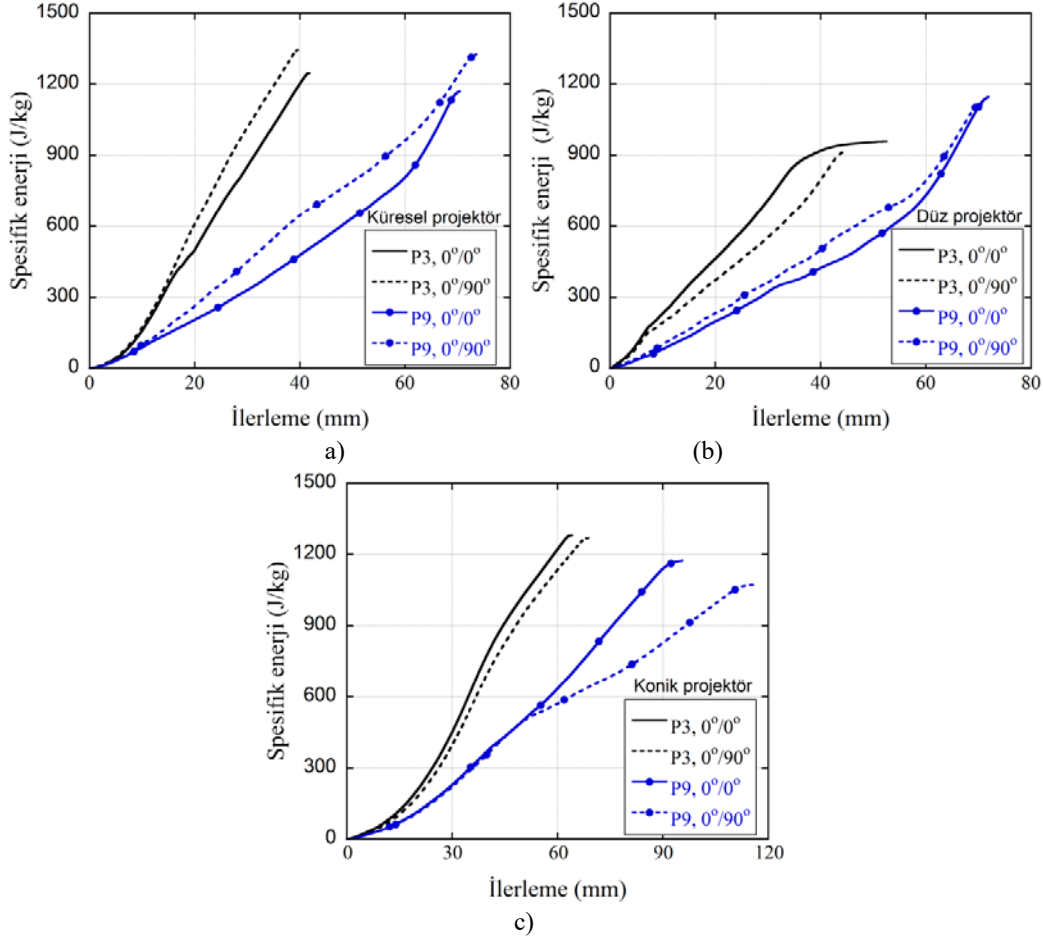


Şekil 9. Panelin arka kısmına geçen basınç miktarı: (a) P3 ve (b) P9 panelleri.  
(The pressure at the backing plate: (a) P3 and (b) P9 sandwich panel.)

gerçekleştirilen testlerde P9 panelleri daha çok enerji sönümlerken, konik projektörler ile test edilen yapılarda P3 panelleri P9 panellerinden daha fazla enerji sönümlenmiştir. Ancak kor yüksekliğinin azalması ile efektif ezilme uzunluğunun düştüğü görülmüştür.

Küresel projektör ile gerçekleştirilen testler sonunda 0°/90° kor oryantasyonlu P3 ve P9 panellerinin, 0°/0° kor

oryantasyonlu panellere göre daha fazla enerji sönümlendiği görülmüştür (Şekil 10a). Düz projektör ile yapılan testlerde P3 paneli 0°/0° kor oryantasyonunda, P9 paneli ise 0°/90° kor oryantasyonunda daha fazla enerji sönümlenmiştir (Şekil 10b). Konik projektör ile yapılan testlerde P3 paneli 0°/0° kor oryantasyonunda daha fazla enerji sönümlendiği görülmüştür ancak fark ihmal edilebilir seviyededir (Şekil 10c). P9 panelinde ise 58 mm'ye kadar 0°/0° ve 0°/90°



**Şekil 10.** P3 ve P9 panellerinin spesifik enerji-ilerleme eğrileri a) küresel b) düz ve c) konik projektör.  
 (The specific energy-displacement curves of P3 and P9 panels (a) spherical (b) flat and (c) conic-end projectile)

oryantasyonlu paneller aynı değerde enerji sönmülemiştir ancak bu ilerleme değerinden sonra 0°/90° panel tamamen delinmiş, bu nedenle enerji sönmüleme değerleri düşmüştür.

## SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, sert lehim ve poliüretan ile birleştirilmiş oluklu kora sahip alüminyum sandviç yapıların darbe testleri gerçekleştirilerek deformasyonları ve enerji sönmüleme kapasiteleri incelenmiştir. Ayrıca kor katman yüksekliğinin panel deformasyonuna ve enerji sönmüleme kapasitesine olan etkisi 3 ve 9 mm kor yüksekliği kullanılarak belirlenmiştir. Çalışma sonunda aşağıda sıralanan sonuçlara ulaşılmıştır;

Sert lehimle birleştirilen paneller delinmemektedir ve darbe enerjisini panelin tüm yüzeyine yayabilmektedir. Poliüretan ile yapıştırılan paneller ise delinmekte ve sadece darbe bölgesinde deformasyona uğramaktadır. Nümerik modeller 3 mm yüksekliğe sahip oluklu kor katmanlarının burkulma/ezilme tipi deformasyona uğradıklarını göstermiştir. 9 mm kor yüksekliğine sahip oluklu sandviç yapılar darbe enerjisini panel yüzeyine daha homojen olarak dağıtabilmekte bu da panelin arka kısmına geçen basıncın

önemli miktarda azalmasına sebep olmaktadır. 3 mm kor yüksekliğine sahip oluklu sandviç yapılar 0°/0° kor oryantasyonunda daha fazla enerji sönmülemektedirler.

Panellerin enerji sönmüleme kapasitelerinin projektör/yükleme şekline ve kor oryantasyonundan etkilendiği görülmüştür. Bu sebeple farklı uygulama alanları için özel sandviç panel tasarımı yapılması gerektiği görülmüştür.

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Wang, S.L., Ding, Y.Y., Wang, C.F., Zheng, Z.J., Yu, J.L., 2017. Dynamic material parameters of closed-cell foams under high-velocity impact, *International Journal of Impact Engineering*, 99, 111-121.
2. Pang, X., Du, H.J., 2017. Dynamic characteristics of aluminium foams under impact crushing, *Compos. Pt. B-Eng.*, 112, 265-277.
3. Zhang, P., Cheng, Y.S., Liu, J., Li, Y., Zhang, C.Z., Hou, H.L., Wang, C.M., 2016. Experimental study on the dynamic response of foam-filled corrugated core sandwich panels subjected to air blast loading, *Compos. Pt. B-Eng.*, 105, 67-81.



4. Zhang, B.Y., Lin, Y.F., Li, S., Zhai, D.X., Wu, G.H., 2016. Quasi-static and high strain rates compressive behavior of aluminum matrix syntactic foams, *Compos. Pt. B-Eng.*, 98, 288-296.
5. Sadot, O., Ram, O., Anteby, I., Gruntman, S., Ben-Dor, G., 2016. The trapped gas effect on the dynamic compressive strength of light aluminum foams, *Mater. Sci. Eng. A-Struct. Mater. Prop. Microstruct. Process.*, 659, 278-286.
6. Liu, H., Zhang, Z.Q., Liu, H., Yang, J.L., 2016. Effect of elastic target on Taylor-Hopkinson impact of low-density foam material, *International Journal of Impact Engineering*, 94, 109-119.
7. Dou, R.J., Qiu, S.W., Ju, Y., Hu, Y.B., 2016. Simulation of compression behavior and strain-rate effect for aluminum foam sandwich panels, *Comput. Mater. Sci.*, 112, 205-209.
8. Zhang, D.H., Fei, Q.G., Zhang, P.W., 2017. In-plane dynamic crushing behavior and energy absorption of honeycombs with a novel type of multi-cells, *Thin-Walled Structures*, 117, 199-210.
9. Keshavanarayana, S.R., Shahverdi, H., Kothare, A., Yang, C., Bingenheimer, J., 2017. The effect of node bond adhesive fillet on uniaxial in-plane responses of hexagonal honeycomb core, *Composite Structures*, 175, 111-122.
10. Qiao, J.X., Chen, C.Q., 2016. In-plane crushing of a hierarchical honeycomb, *International Journal of Solids and Structures*, 85-86, 57-66.
11. Tao, Y., Chen, M.J., Chen, H.S., Pei, Y.M., Fang, D.N., 2015. Strain rate effect on the out-of-plane dynamic compressive behavior of metallic honeycombs: Experiment and theory, *Composite Structures*, 132, 644-651.
12. Bai, Z.Y., Wang, D.M., Xu, Z.F., 2015. Model creation of strain rate-dependent energy absorption for paper honeycomb sandwich structure, *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 17, 359-375.
13. Aktay, L., Johnson, A., Kroplin, B., 2008. Numerical modelling of honeycomb core crush behaviour, *Engineering Fracture Mechanics*, 75, 2616-2630.
14. Radford, D.D., Fleck, N.A., Deshpande, V.S., 2006. The response of clamped sandwich beams subjected to shock loading, *International Journal of Impact Engineering*, 32, 968-987.
15. Liang, C.-C., Yang, M.-F., Wu, P.-W., 2001. Optimum design of metallic corrugated core sandwich panels subjected to blast loads, *Ocean Engineering*, 28, 825-861.
16. Tilbrook, M.T., Radford, D.D., Deshpande, V.S., Fleck, N.A., 2007. Dynamic crushing of sandwich panels with prismatic lattice cores, *International Journal of Solids and Structures*, 44, 6101-6123.
17. Liang, Y., Louca, L., Hobbs, R., 2007. Corrugated panels under dynamic loads, *International Journal of Impact Engineering*, 34, 1185-1201.
18. Zhang, Y.C., Zhang, S.L., Wang, Z.L., 2011. Crush Behavior of Corrugated Cores Sandwich Panels, *Advanced Materials Research*, 217-218, 1584-1589.
19. Cote, F., Deshpande, V., Fleck, N., Evans, A.G., 2006. The compressive and shear responses of corrugated and diamond lattice materials, *International Journal of Solids and Structures*, 43, 6220-6242.
20. Rubino, V., Deshpande, V., Fleck, N., 2008. The dynamic response of end-clamped sandwich beams with a Y-frame or corrugated core, *International Journal of Impact Engineering*, 35, 829-844.
21. Rubino, V., Deshpande, V.S., Fleck, N.A., 2009. The dynamic response of clamped rectangular Y-frame and corrugated core sandwich plates, *European Journal of Mechanics - A/Solids*, 28, 14-24.
22. Wadley, H.N.G., 2006. Multifunctional periodic cellular metals, *Philos. Trans. R. Soc. A-Math. Phys. Eng. Sci.*, 364, 31-68.
23. Zhang, Y.C., Zhang, S.L., Wang, Z.L., Crush Behavior of Corrugated Cores Sandwich Panels, in: M. Zhou (Ed.) *High Performance Structures and Materials Engineering*, Pts 1 and 2, Trans Tech Publications Ltd, Stafa-Zurich, 2011, pp. 1584-1589.
24. Hou, S., Zhao, S., Ren, L., Han, X., Li, Q., 2013. Crashworthiness optimization of corrugated sandwich panels, *Materials & Design*, 51, 1071-1084.
25. Rejab, M.R.M., Cantwell, W.J., 2013. The mechanical behaviour of corrugated-core sandwich panels, *Composites Part B: Engineering*, 47, 267-277.
26. Sun, Y.L., Li, Q.M., 2018. Dynamic compressive behaviour of cellular materials: A review of phenomenon, mechanism and modelling, *International Journal of Impact Engineering*, 112, 74-115.
27. Cao, B.T., Hou, B., Zhao, H., Li, Y.L., Liu, J.G., 2018. On the influence of the property gradient on the impact behavior of graded multilayer sandwich with corrugated cores, *International Journal of Impact Engineering*, 113, 98-105.
28. Cao, B.T., Hou, B., Li, Y.L., Zhao, H., 2017. An experimental study on the impact behavior of multilayer sandwich with corrugated cores, *International Journal of Solids and Structures*, 109, 33-45.
29. Sankaya, M., Tasdemirci, A., Guden, M., 2018. Dynamic crushing behavior of a multilayer thin-walled aluminum corrugated core: The effect of velocity and imperfection, *Thin-Walled Structures*, 132, 332-349.
30. Odac, I.K., Guden, M., Kılıçaslan, C., Tasdemirci, A., 2017. The varying densification strain in a multi-layer aluminum corrugate structure: Direct impact testing and layer-wise numerical modelling, *International Journal of Impact Engineering*, 103, 64-75.
31. Kılıçaslan, C., Odacı, İ.K., Güden, M., 2016. Single- and double-layer aluminum corrugated core sandwiches under quasi-static and dynamic loadings, 18, 667-692.
32. Liu, T., Turner, P., 2017. Dynamic compressive response of wrapped carbon fibre composite corrugated cores, *Composite Structures*, 165, 266-272.
33. Huang, W., Zhang, W., Ye, N., Li, D.C., Dynamic response of clamped corrugated sandwich plates subjected to underwater impulsive loads, in: R. Chau, T. Germann, I. Oleynik, S. Peiris, R. Ravelo, T. Sewell

- (Eds.) Shock Compression of Condensed Matter - 2015, Amer Inst Physics, Melville, 2017.
34. Huang, W., Zhang, W., Huang, X.L., Jiang, X.W., Li, Y., Zhang, L., 2017. Dynamic response of aluminum corrugated sandwich subjected to underwater impulsive loading: Experiment and numerical modeling, International Journal of Impact Engineering, 109, 78-91.
35. Kılıçaslan, C., Güden, M., Odacı, İ.K., Taşdemirci, A., 2013. The impact responses and the finite element modeling of layered trapezoidal corrugated aluminum core and aluminum sheet interlayer sandwich structures, Materials & Design, 46, 121-133.