

T.C.
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ
BİLİMSEL ARAŞTIRMA PROJELERİ
KOORDİNASYON BİRİMİ



**FONKSİYONEL KADEMELENDİRİLMİŞ PLAKALAR İLE
DESTEKLENMİŞ BAL PETEĞİ SANDVIÇ YAPILARIN ÜRETİM
ŞARTLARININ İYİLEŞTİRİLEREK BALİSTİK PERFORMANSLARININ
ARAŞTIRILMASI**

Proje No: FBA-2016-6503

Normal Araştırma Projesi

SONUÇ RAPORU

Proje Yürütücüsü:

Doç. Dr. Recep GÜNEŞ
Mühendislik Fakültesi/Makine Mühendisliği Bölümü

Araştırmacılar:

Prof. Dr. M. Kemal APALAK
Mühendislik Fakültesi/Makine Mühendisliği Bölümü

Arş. Gör. Kemal ARSLAN
Fen Bilimleri Enstitüsü/Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Kasım 2017
KAYSERİ

TEŞEKKÜR

Proje ekibi olarak, Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi' ne FBA-2016-6503 kodlu proje desteklerinden dolayı teşekkür ederiz.

Doç. Dr. Recep GÜNEŞ

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iii
ABSTRACT	iv
1. GİRİŞ	1
1.1. Amaç ve Kapsam	1
2. GENEL BİLGİLER	2
3. GEREÇ VE YÖNTEM	5
3.1. Sandviç Yapı Elemanlarının Teknik Özellikleri	5
3.1.1. Fonksiyonel Kademelendirilmiş Yüzey Plakaları	5
3.1.2. Bal Peteği Çekirdek	6
3.2. Deneysel Çalışmalar	6
3.2.1. Fonksiyonel Kademelendirilmiş Yüzey Plakalarının Üretimi	6
3.2.2. Sandviç Yapı Numunelerinin Hazırlanması	10
3.2.3. Balistik Test Sistemi	12
3.3. Sayısal Modelleme	14
4. BULGULAR	18
4.1. Balistik Test Sonuçları	18
4.2. Sayısal Analiz Sonuçları	23
5. TARTIŞMA VE SONUÇ	25
KAYNAKLAR	25

ÖZET

Bu projede, toz metalürjisi ile üretilen Al/B₄C fonksiyonel kademelendirilmiş yüzey plakalarının üretim şartlarının iyileştirilmesi ve üretilen plakalar ile alüminyum bal peteğinden oluşan sandviç yapının balistik çarpma yükleri altındaki davranışları deneysel ve sayısal olarak araştırılmıştır. Yüzey plakaları, vakum ve atmosfer kontrollü bir sıcak pres ünitesi kullanılarak metal-zengin, lineer ve seramik-zengin bileşimler için üretilmiştir. Balistik testler, 0.30 kalibre parçacık benzetimli çelik mermiler kullanılarak tek kademeli gaz silah sistemi ile gerçekleştirilmiştir. Balistik test sonuçları, yüzey plakalarının malzeme bileşimindeki değişimin, sandviç yapının hasar modları ve mekanizmaları, enerji sönümleme kabiliyeti ve çarpma direnci üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Sandviç yapı numunelerinin sayısal modeli, LS-DYNA® sonlu elemanlar yazılımı kullanılarak geliştirilmiştir. Sonlu elemanlar modelinde, fonksiyonel kademelendirilmiş yüzey plakalarını oluşturan katmanların içerdiği seramik oranına bağlı olarak, plaka davranışının sünek veya gevrek olma durumuna göre farklı malzeme modelleri kullanılmıştır. Bu doğrultuda, yüzey plakalarının metal-zengin katmanları için elastoplastik bir malzeme modeli (Piecewise-Linear-Plasticity), seramik-zengin katmanları için ise, seramik bir malzeme modeli (Johnson-Holmquist-Ceramics) kullanılmıştır. Fonksiyonel kademelendirilmiş yüzey plakalarının sayısal modellenmesinde dikkate alınan yaklaşım genel olarak başarılı bir sonuç vermiştir.

Anahtar Kelimeler: Sandviç yapılar, Fonksiyonel kademelendirilmiş malzemeler, Bal peteği, Üretim optimizasyonu, Balistik test.

ABSTRACT

In this project, optimization of production conditions of Al/B₄C functionally graded face plates that was produced by powder metallurgy and ballistic impact behavior of the sandwich structures consisting of the production-optimized face plates and an aluminum honeycomb core were investigated using experimental and numerical techniques. The face plates were produced by a vacuum and atmosphere controlled hot-press unit for metal-rich, linear, and ceramic-rich compositions. Ballistic impact tests were performed using 0.30 caliber fragment simulating projectiles via a single-stage gas gun system. The ballistic test results showed that the material composition variation of the face plates has a significant effect on damage modes and mechanisms, energy absorption capability, and impact resistance of the sandwich structure. The numerical model of the sandwich structure specimens was developed using LS-DYNA[®] finite element software. In finite element modelling, different material models were used depending on the ceramic fraction in the layers of the face plates in terms of ductile or brittle behavior of the layers. Accordingly, an elastoplastic material model (Piecewise-Linear-Plasticity) and a ceramic material model (Johnson-Holmquist-Ceramics) were used for the metal-rich and ceramic-rich layers of the face plates. The considered approach in numerical modelling of the face plates showed a successful result in general.

Keywords: Sandwich structures, Functionally graded materials, Honeycomb, Production optimization, Ballistic test.

1. GİRİŞ

Savunma sanayi için zırh yapılarının tasarımı ve geliştirilmesi oldukça önemli bir konudur. Yeni malzeme türlerinin veya uygun malzeme kombinasyonlarının bulunması ile zırh yapılarının performansı geliştirilebilmektedir. Zırh yapılarından beklenen yüksek balistik performans ve hafiflik, kompozit yapıların tasarımı ile sağlanabilir. Bu amaçla, modern savunma sistemlerinde, her birinin farklı bir işlevi yerine getirdiği malzemelerden oluşan hibrit zırh yapıları kullanılmaktadır. Hibrit zırh yapılarında, sahip oldukları yüksek basma dayanımı, sertlik ve termal direnç ile seramik malzemeler en önemli bileşenlerden biridir. Seramik malzemeler, kırılğan bir yapıya sahip oldukları için zırh yapılarında monolitik halde kullanılamayıp farklı malzemeler ile birleştirilerek ön yüz plakası olarak kullanılmaktadırlar. Çarpma yüzeyinde kullanılan seramik tabakanın amacı, mermi uç geometrisini deforme ederek merminin delme kapasitesini azaltmak ve alt tabakalara ilerlemesini engellemektir. Mermi kinetik enerjisinin sönmülmesi metallerde plastik deformasyon ile gerçekleşirken, seramiklerde hasar mekanizmaları ile gerçekleşmektedir. Seramiklerin hasar mekanizmaları kırılğan yapılarından dolayı genellikle kırılma ve parçalanma şeklinde oluşur. Bu yüzden, zırh yapılarında seramik plakanın arkasında mermiden veya hedeften kopan parçaları tutmak ve merminin kalan enerjisini sönmölemek amacıyla metaller veya fiber takviyeli polimer kompozitler gibi daha sünek yapılı malzemeler kullanılmaktadır. Bu amaç doğrultusunda, fonksiyonel kademelendirilmiş malzemeler (*Functionally Graded Materials, FGMs*) etkin bir çözüm olabilmektedir. Fonksiyonel kademelendirilmiş malzemeler, genellikle seramik ve metal bileşenlerden oluşan ve malzeme bileşiminin yapı içerisinde belirli bir doğrultuda sürekli olarak değıştiğı bir kompozit malzeme sınıfıdır. Ayrıca, seramik ve metal bileşenlerin kendine özgü özelliklerini tek bir yapıda birleştiren bir kompozit malzemedir. Balistik yükler altında, seramik bileşen yapıya yüksek nüfuziyet direnci kazandırırken, metal bileşen tokluk ve süneklilik sağlar. Bu açıdan, fonksiyonel kademelendirilmiş malzemelerin zırh olarak tasarlanması giderek ilgi çeken bir araştırma konusu olmaktadır.

1.1. Amaç ve Kapsam

Bu proje kapsamında, proje ekibinin fonksiyonel kademelendirilmiş malzeme üretimi için daha önce kullandığı sistemden kaynaklanan bazı teknik sıkıntılardan dolayı, numune kalitesinin giderek bozulması nedeniyle yeni bir üretim sisteminin temin edilmesi ve bu sistem ile üretilecek numune kalitesinin iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Numune kalitesinde istenilen başarı elde edildikten sonra, üretilen fonksiyonel kademelendirilmiş yüzey plakaları ve

alüminyum bal peteği ile oluşturulan sandviç yapının balistik performansı incelenmiştir. Proje çalışmaları, deneysel ve sayısal olarak iki aşamada yürütülmüştür. Deneysel çalışmaların temelini, fonksiyonel kademelendirilmiş plakaların üretim kalitesinin iyileştirilmesi ve balistik çarpma testleri oluşturmaktadır. Fonksiyonel kademelendirilmiş yüzey plakaları toz istifleme-sıcak presleme yöntemi ile üretilmiştir. Fonksiyonel kademelendirilmiş plakaların üretimindeki en önemli parametrelerden biri seramik ve metal bileşenlerin bağlanma durumudur. Bu durum, sinterleme sürecindeki sıcaklık, basınç ve atmosfer kontrolü gibi parametreler ile oldukça bağlantılıdır. Üretim sürecini etkileyen bu parametrelerin kontrolü de numune kalitesi açısından oldukça önemlidir. Özellikle, basınç ve sıcaklıktaki ani değişimler numune ara yüzey şartlarını olumsuz yönde etkileyerek katmanlar arası ayrılmalara neden olabilmektedir. Fonksiyonel kademelendirilmiş malzemelerde ara yüzey şartlarını etkileyen olumsuz etkilerin azaltılarak numune kalitesinin artırılması, üretim parametrelerinin optimizasyonu ile sağlanabilir. Bu amaçla, proje bütçesiyle vakum ve atmosfer kontrollü yeni bir sıcak pres ünitesi temin edilmiş ve üretimlerin tamamı bu sistem ile yapılmıştır. Projenin diğer amacı, deneysel sonuçlar ile en uyumlu sonuçları sağlayacak sayısal modelin geliştirilmesidir. Bu amaçla, balistik testleri gerçekleştirilen sandviç yapı numunelerinin sayısal modeli, LS-DYNA® sonlu elemanlar yazılımı kullanılarak oluşturulmuştur. Sayısal çalışmalarda kullanılan malzeme modellerinin sonuçlar üzerine etkisi oldukça önemlidir. Bu yüzden, sayısal modelde kullanılan malzeme modelleri, yüzey plakalarının sünek veya gevrek olma durumuna göre seçilmiştir.

2. GENEL BİLGİLER

Genel olarak, yüksek dayanıma sahip yüzey plakaları ve düşük yoğunluklu çekirdek malzemesinden oluşan sandviç yapılar, sahip oldukları yüksek eğilme dayanımı, hafiflik ve yüksek enerji sönümleme kabiliyeti ile havacılık ve uzay, gemicilik, otomotiv, savunma sanayi gibi oldukça geniş bir alanda kullanılmaktadırlar. Uygulama alanına yönelik olarak, farklı yüzey plakaları ve çekirdek malzemeleri ile tasarlanabilmektedirler. Yüzey plakaları, genellikle fiber takviyeli polimer kompozitlerden veya alüminyum alaşımlarından oluşabilmektedir. Çekirdek malzemesi olarak ise, bal petekleri, metal köpükler veya polimer esaslı köpükler gibi gözenekli yapılar kullanılmaktadır. Gözenekli yapılar, hafif olmalarının yanı sıra yüksek enerji sönümleme kabiliyetleri ile özellikle yapıya etki eden çarpma yükleri altında oluşan enerjinin sönümlenmesi amacıyla kullanılırlar. Bal peteği, çarpma yükleri altında kullanılan en yaygın çekirdek malzemelerinden biridir ve bal peteği sandviç yapıların koruyucu zırh olarak havacılık ve uzay sanayinde kullanımı giderek artmaktadır. Bu yüzden, yüksek veya hiper hızlı çarpma

yüklerine maruz bal peteği sandviç yapılar üzerine literatürde deneysel, sayısal ve analitik yöntemler kullanılarak yapılan farklı çalışmalar mevcuttur [1-8]. Bu çalışmada ise, fonksiyonel kademelendirilmiş plakalar ve bal peteği ile oluşturulan sandviç yapının balistik çarpma yükleri altındaki davranışları araştırılmıştır. Fonksiyonel kademelendirilmiş malzemeler ve benzer yapıların balistik çarpma yükleri altındaki davranışları ile ilgili literatürde sınırlı sayıda çalışma mevcuttur ve giderek ilgi çeken bir alan olmaktadır.

Chin [9], metal matrisli kompozitlerin, fonksiyonel kademelendirilmiş zırh yapıları olarak geliştirilmesi üzerine üretim, yüksek şekil değiştirme hızlarındaki testler, balistik testler ve modelleme gibi önemli noktalara dikkat çekmiştir. Petterson vd. [10], 7.62 mm zırh delici mermi kullanarak Ti/TiB₂ fonksiyonel kademelendirilmiş zırh yapılarının balistik davranışı üzerine deneysel bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Numuneler, spark plazma sinterleme ve sıcak izostatik presleme yöntemleri ile üretilmiş olup, spark plazma sinterleme ile üretilen numuneler daha iyi performans sergilemiştir. Balistik test sonuçları, ön yüzeyin uygun bir bileşim oluşturularak %100 seramik bir tabaka olmak zorunda olmadığını göstermiştir. Templeton vd. [11], Al/AlN fonksiyonel kademelendirilmiş zırh yapıları üzerine sayısal bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Zırh yapısı, kalınlık boyunca değişen malzeme bileşimini dikkate alacak şekilde altı katman olarak modellenmiş ve iki katmanlı AlN-Al yapısı ile karşılaştırılmıştır. Katmanlardaki seramik içeriğine bağlı olarak, ilgili katmanın davranışına uygun malzeme modeli tanımlanmıştır. AlN seramik bileşeni için Johnson-Holmquist-Beissel [12] ve Al metal bileşeni için Johnson-Cook [13] malzeme modelleri kullanılmıştır. Altı katmanlı fonksiyonel kademelendirilmiş yapı, iki katmanlı AlN-Al yapısına kıyasla %15 daha iyi balistik performans sergilemiştir. Egtesad vd. [14], Al/AlN fonksiyonel kademelendirilmiş malzemelerin yüksek hızlı çarpma yükleri altındaki dinamik davranışlarını, bir parçacık algoritması kullanarak sayısal olarak modellemişlerdir. Fonksiyonel kademelendirilmiş malzemelerin akma ve kırılma davranışlarını tanımlamak için karma mukavemet modelini sigmoid formülasyonu ile birlikte kullanmışlardır. Bu mukavemet modeli, sürekli ortamlar hasar yaklaşımı ile Johnson-Cook dinamik akma ilişkisi ve Johnson-Holmquist-Beissel kırılma modelini içermektedir. Bu mukavemet modeli sayesinde, fonksiyonel kademelendirilmiş malzemelerin yüksek hızlı darbe etkisi altında hem plastik şekil değişimi hem de gevrek kırılma cevabının modellenebileceği görülmüştür. Huang ve Chen [15], toz metalurjisi yöntemi ile üretilmiş bir seramik/seramik (Al₂O₃/ZrO₂) fonksiyonel kademelendirilmiş kompozit yapının balistik performansını, 7.62 mm zırh delici mermi kullanarak deneysel ve sayısal olarak araştırmışlardır. Al₂O₃/ZrO₂ fonksiyonel kademelendirilmiş kompozit, aynı alansal yoğunluğa

sahip katmanları yapıştırıcı ile birleştirilmiş çok katmanlı $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2$ seramik kompozit ve %100 Al_2O_3 ile karşılaştırılmıştır. Fonksiyonel kademelendirilmiş yapı, ara yüzeylerde oluşan çekme dalgalarını azaltarak ve çatlak ilerlemesini geciktirerek daha iyi bir performans sergilemiştir. Aydın ve Apalak [16], Al/SiC fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plakaların balistik performansını, 9 mm Parabellum mermi kullanarak deneysel olarak araştırmışlardır. Balistik testler, toz istifleme-sıcak presleme tekniği ile üretilen metal-zengin, lineer ve seramik-zengin bileşime sahip numuneler için gerçekleştirilmiştir. Balistik test sonuçları, lineer bileşime sahip numunenin en yüksek balistik performansı sergilediğini göstermiştir. Gunes vd. [17], Al/SiC fonksiyonel kademelendirilmiş plakalar ile desteklenmiş alüminyum bal peteği sandviç yapıların balistik performansını, sonlu elemanlar yöntemi ile sayısal olarak incelemişlerdir. Fonksiyonel kademelendirilmiş plakaların malzeme bileşimindeki değişimin, sandviç yapının balistik performansına etkisi araştırılmış ve her bir sandviç yapının balistik limiti belirlenmiştir. Ayrıca, bal peteği çekirdek malzemesinin sandviç yapının balistik performansına katkısını anlamak için aynı plakalara sahip sandviç yapı ve boşluklu plakalar kıyaslanmıştır. Plakalardaki seramik oranının artmasıyla, yapının nüfuziyet direncinin arttığı ve bal peteğinin enerji sönmüleme ve alt plaka hasarı açısından sandviç yapıya önemli bir katkı sağladığı görülmüştür. Arslan vd. [18], sayısal modeli geliştirilen sandviç yapının [17] balistik testlerini gerçekleştirmiş ve önceki çalışmada oluşturulan sonlu elemanlar modeli üzerinde kalibrasyon çalışmaları yapmışlardır. Analizleri gerçekleştirilen sandviç yapı numunelerinden, metal-zengin ve lineer bileşime sahip plakalar için belirli oranda başarı sağlanırken, seramik-zengin bileşime sahip plakalar için sayısal analizler uyumlu sonuçlar vermemiştir. Ayrıca, plakalardaki seramik oranının, sandviç yapının hasar mekanizması ve enerji sönmüleme kabiliyeti üzerinde oldukça etkili olduğu görülmüş ve test edilen malzeme bileşimleri arasında en yüksek balistik performansı lineer bileşime sahip sandviç yapı göstermiştir.

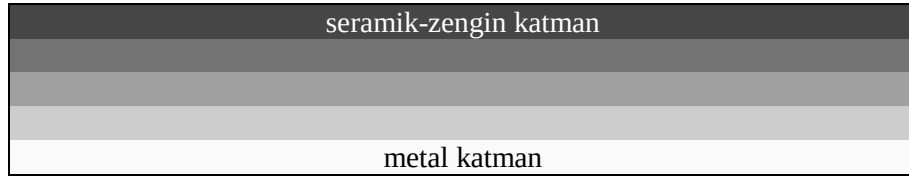
Bu projede, üretim kalitesinin iyileştirilmesi amaçlanan Al/ B_4C fonksiyonel kademelendirilmiş yüzey plakaları ile desteklenmiş alüminyum bal peteği sandviç yapıların balistik performansı deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Plakaların üretim kalitesinin iyileştirilmesi için vakum ve atmosfer kontrollü yeni bir pres sistemi ile üretimler gerçekleştirilmiştir. İstenilen üretim kalitesinin elde edilmesi ile, sandviç yapı numunelerinin balistik testleri tek kademeli gaz silah sistemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Balistik testleri gerçekleştirilen sandviç yapı numuneleri için fonksiyonel kademelendirilmiş plakaların mekanik davranışlarına göre uygun malzeme modelleri kullanılarak sonlu elemanlar modeli geliştirilmiştir.

3. GEREÇ VE YÖNTEM

3.1. Sandviç Yapı Elemanlarının Teknik Özellikleri

3.1.1. Fonksiyonel Kademelendirilmiş Yüzey Plakaları

Fonksiyonel kademelendirilmiş yüzey plakaları, kalınlık boyunca metal katmandan seramik-zengin katmana değişen şekilde tasarlanmıştır (Şekil 1). Yüzey plakalarının malzeme bileşimindeki değişim, kalınlık boyunca bir kuvvet kanununa göre dikkate alınmıştır.



Şekil 1. Fonksiyonel kademelendirilmiş yüzey plakalarının kalınlık boyunca şematik kesiti

Bileşenlerin hacimsel oranları arasındaki ilişki,

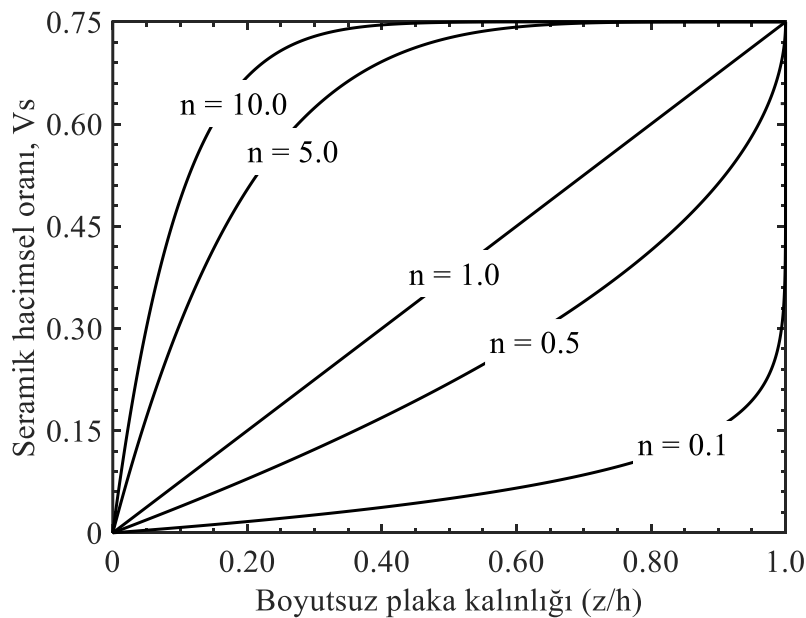
$$V_s + V_m = 1 \quad (1)$$

eşitliği ile ifade edilir. Burada, s ve m alt indisleri, seramik ve metal bileşenleri ifade etmektedir.

Kalınlık boyunca metal bileşenin hacimsel oranı,

$$V_m(z) = \left(1 - \frac{z}{h}\right)^n \quad (2)$$

şeklinde ifade edilmiştir. Burada, z kalınlık boyunca koordinat değişkeni, h plaka kalınlığı ve n malzeme bileşimini kontrol eden keyfi bir üstür (Şekil 2).

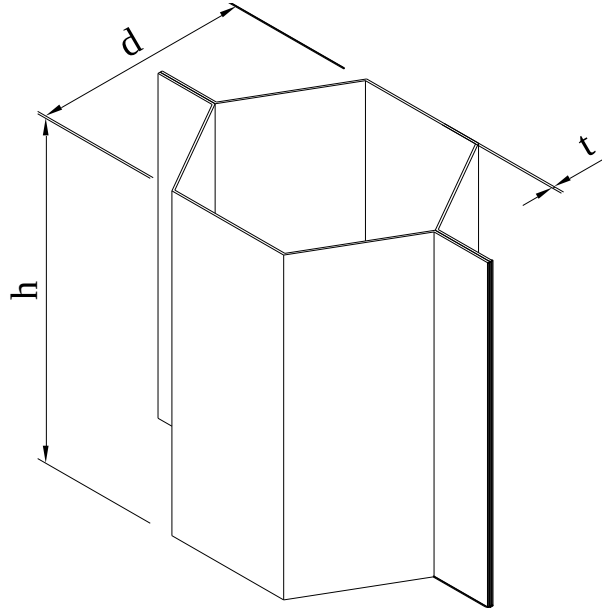


Şekil 2. Seramik hacimsel oranının kalınlık boyunca değişimi

Bu çalışmada, sırasıyla ortalama 44.5 mikron ve 10 mikron toz boyutlarına sahip bor karbür (B_4C) ve alüminyum 6061 alaşımı ($Al6061$) bileşenleri kullanılmıştır. Yüzey plakaları, metal katmandan seramik-zengin katmana (%75 B_4C -%25 $Al6061$) değişen şekilde 5 katmandan oluşmaktadır. Kademelendirilmiş bölgedeki hacimsel oranlar, bileşimsel değişim üssü (n) ile ayarlanmıştır. Plaka boyutları, 56x56x8 mm olacak şekilde dikkate alınmıştır.

3.1.2. Bal Peteği Çekirdek

Çekirdek malzemesi olarak alüminyum bal peteği kullanılmıştır. Şekil 3’ de şematik olarak gösterilen bir bal peteği hücresi, spesifik olarak hücre boyutu d , çekirdek yüksekliği h ve folyo kalınlığı t ile tanımlanmaktadır. Bu çalışmada, 6.35 mm hücre boyutu, 18 mm çekirdek yüksekliği ve 70 mikron folyo kalınlığına sahip $Al3003-H19$ alüminyum bal peteği çekirdek kullanılmıştır.



Şekil 3. Şematik bir bal peteği hücresi

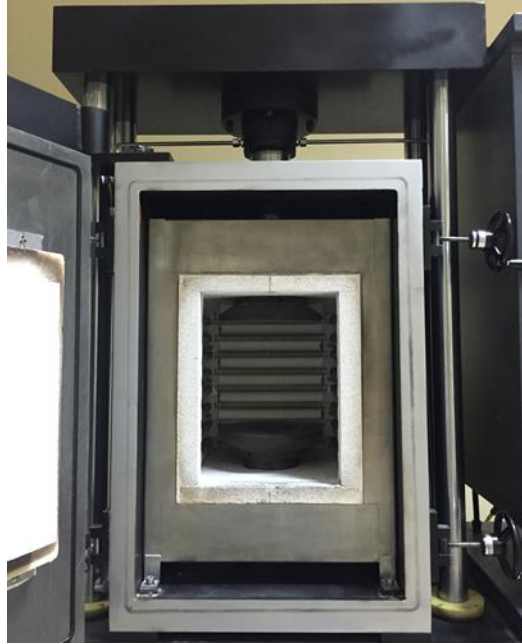
3.2. Deneysel Çalışmalar

Deneysel çalışmalar, fonksiyonel kademelendirilmiş yüzey plakalarının üretimi, bal peteği sandviç yapı numunelerinin hazırlanması ve balistik testlerin gerçekleştirilmesi aşamalarından oluşmaktadır.

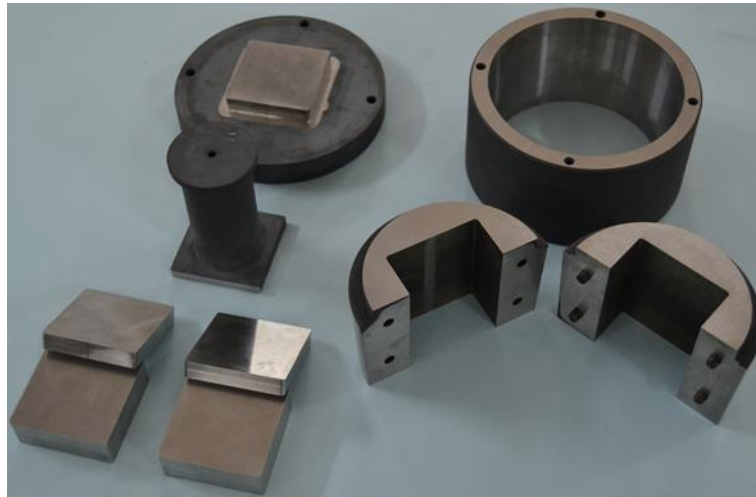
3.2.1. Fonksiyonel Kademelendirilmiş Yüzey Plakalarının Üretimi

Fonksiyonel kademelendirilmiş yüzey plakaları, proje bütçesi ile temin edilen vakum ve atmosfer kontrollü sıcak pres ünitesi (Şekil 4) kullanılarak toz istifleme-sıcak presleme yöntemi ile üretilmiştir. Bu yöntem temel olarak, toz istifleme ve sinterleme şeklinde iki süreçten

oluşmaktadır. Bu üretim süreçlerinde kullanılmak üzere, Şekil 5’ de gösterilen AISI2344 sıcak iş çeliğinden üretilmiş ve ısıl işlem ile sertleştirilmiş sinterleme kalıbı kullanılmıştır.



Şekil 4. Vakum ve atmosfer kontrollü sıcak pres ünitesi



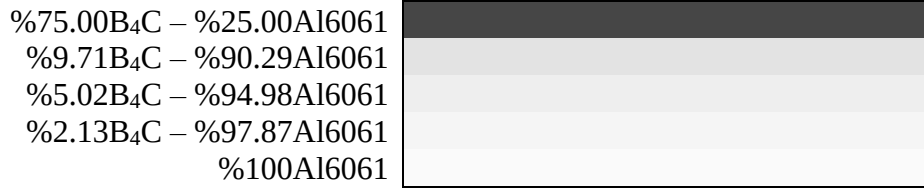
Şekil 5. Plaka üretimlerinde kullanılan sinterleme kalıbı

Yüzey plakalarını oluşturan bileşenlerin hacimsel oranlarının değişimi, bir kuvvet kanununa göre dikkate alınmış ve Eşitlik (2)’ de tanımlanmıştır. Eşitlik (2), bileşenlerin hacimsel oranlarındaki sürekli değişimi tanımlayan bir ifadedir. Ancak, kullandığımız üretim yöntemi bu ifadenin kesikli formuna uygundur ve şu şekilde ifade edilmiştir:

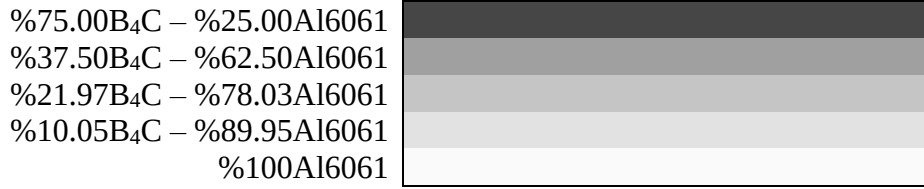
$$V_m = \left(\frac{k - 1}{N - 1} \right)^n \quad (3)$$

$$V_c = 0.75(1 - V_m) \quad (4)$$

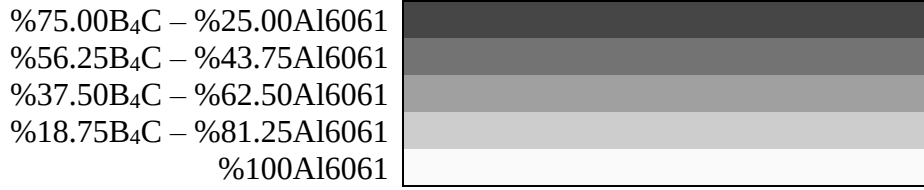
Burada, k katman numarası ve N katman sayısıdır. Böylece, her katman için gereken toz miktarı, bileşenlerin hacimsel oranlarını tanımlayan Eşitlik (3) ve (4) kullanılarak hesaplanmıştır. Fonksiyonel kademelendirilmiş yüzey plakaları, beş farklı n değeri (metal-zengin ($n = 0.1$ ve $n = 0.5$), lineer ($n = 1.0$) ve seramik-zengin ($n = 5.0$ ve $n = 10.0$) bileşimleri) için üretilmiştir. Farklı malzeme bileşimlerine sahip fonksiyonel kademelendirilmiş yüzey plakalarının her bir katmanına ait bileşenlerin hacimsel oranları Şekil 6' da verilmiştir.



(a) $n = 0.1$



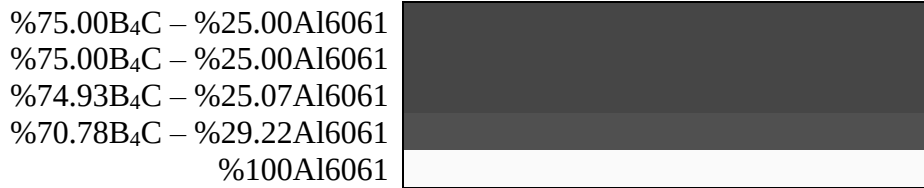
(b) $n = 0.5$



(c) $n = 1.0$



(d) $n = 5.0$

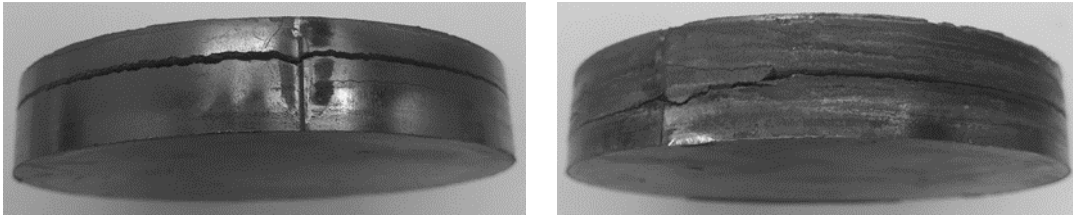


(e) $n = 10.0$

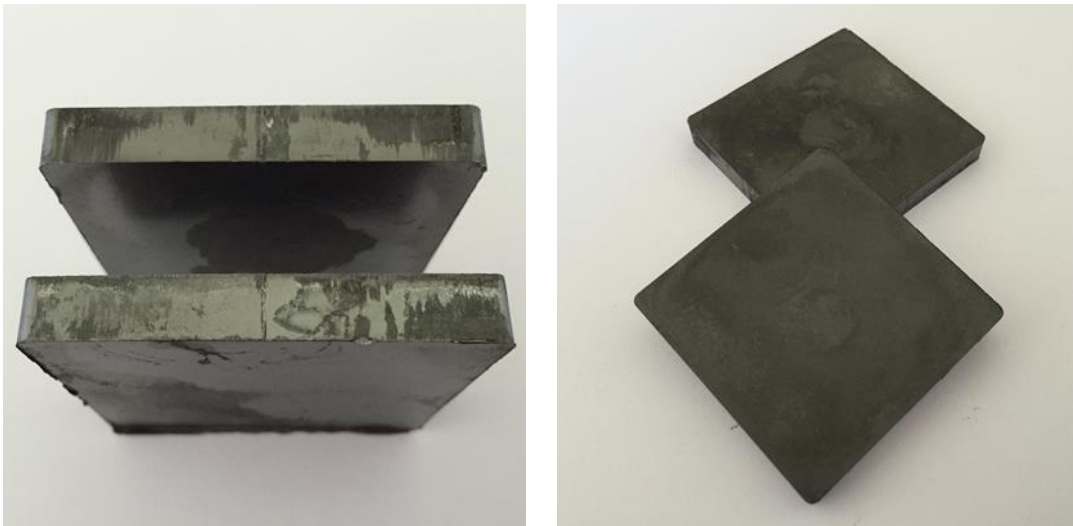
Şekil 6. Farklı malzeme bileşimlerine sahip fonksiyonel kademelendirilmiş yüzey plakalarının her bir katmanına ait bileşenlerin hacimsel oranları

Toz istifleme işleminden önce, toz karışımlarının homojen olmamasından kaynaklanan delaminasyon oluşumunu engellemek için her bir katmanı oluşturan metal ve seramik toz karışımları 5 saat boyunca bir toz karıştırıcısında ayrı ayrı karıştırılmıştır. Sinterleme sürecinde metal bileşenin kalıp parçalarına yapışmasını önlemek ve numunelerin daha kolay çıkarılmasını sağlamak için kalıp parçalarının iç yüzeylerine grafit yağlayıcı uygulanmıştır. Bu ön işlemlerden sonra, her bir katman için gereken toz karışımları sinterleme kalıbında düşük basınç altında sırasıyla istiflenmiştir. İstiflenen ve sıkıştırılan numuneler, koruyucu argon atmosferi ile 115 MPa basınç ve 630 °C sıcaklık altında 1 saat sinterlenmiştir. Sinterleme işleminden sonra, numuneyi termal etkilerden korumak amacıyla, sinterleme kalıbı, kontrollü basınç ve sıcaklık altında soğumaya bırakılmıştır.

Vakum ve atmosfer kontrollü yeni sıcak pres ünitesi ile üretilen numunelerde seramik içeriği daha fazla olmasına rağmen, eski pres sistemi ile üretilen numuneler ile kıyaslandığında gözle görülebilir bir fark elde edilmiştir. Şekil 7’ de eski ve yeni pres sistemleri ile üretilen numuneler karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir. Eski pres sistemi ile üretilen numunelerde oluşan çatlaklar ve ayrılımlar yeni pres sisteminin daha stabil çalışması ile ortadan kaldırılmıştır.



(a)



(b)

Şekil 7. (a) Eski pres sistemi ile üretilen numuneler, (b) Yeni pres sistemi ile üretilen numuneler

Sonuç olarak, yeni pres sistemindeki sıcaklık, basınç, atmosfer kontrolü ve soğutma sisteminin daha stabil olması ile numune kalitesinde ciddi bir iyileşme sağlanmıştır. Diğer bir açıdan, yeni pres sistemi ile zaman, maliyet ve enerji kayıpları eski sisteme göre azaltılmıştır.

3.2.2. Sandviç Yapı Numunelerinin Hazırlanması

Sandviç yapı elemanları, iki bileşenli Araldite® 2015 epoksi yapıştırıcı kullanılarak birleştirilmiştir. Yüzey plakaları 56x56 mm boyutlarında üretilmiş ve bal peteği yüzey plakalarının boyutlarına uygun olarak el makası ile hazırlanmıştır (Şekil 8).



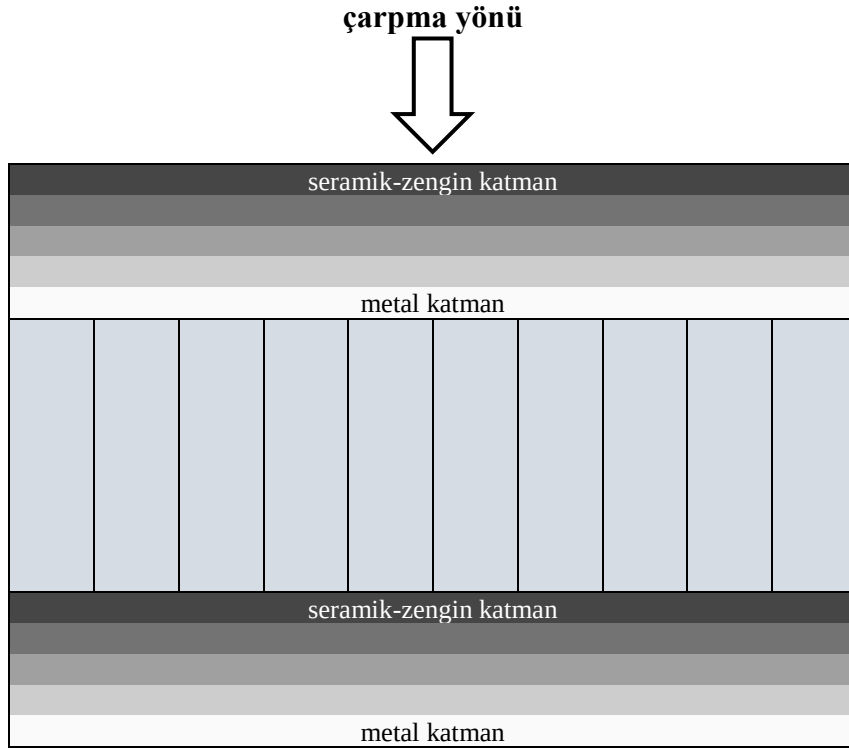
Şekil 8. Yapıştırma işlemi için hazırlanmış sandviç yapı elemanları

Yapıştırıcı uygulanmadan önce, yüzey plakalarının yapıştırma yüzeyleri sırasıyla zımpara ve etanol ile mekanik ve kimyasal temizleme işlemine tabi tutulmuştur. Mekanik temizleme işlemi, kalıp iç yüzeylerine uygulanan ve sinterleme işlemi sırasında sıcaklık etkisiyle numune yüzeylerini kaplayan grafit yağlayıcı tabakasını uzaklaştırmak için uygulanmıştır. Numune yüzeylerinde oluşan bu grafit yağlayıcı tabaka, yapışma kalitesini olumsuz yönde etkilemektedir. Bu yüzden, bu tabakanın yüzeylerden uzaklaştırılması oldukça önemlidir. Kimyasal temizleme işlemi ise, mekanik temizleme işlemi sonrası yüzeylerde kalan kirlilikleri temizlemek için uygulanmıştır. Yapıştırma işleminde düzgün bir yapıştırıcı katmanı elde etmek önemli bir adımdır. Bu yüzden, yapıştırıcı, fonksiyonel kademelendirilmiş plakaların yüzeylerine uygulanmıştır (Şekil 9).

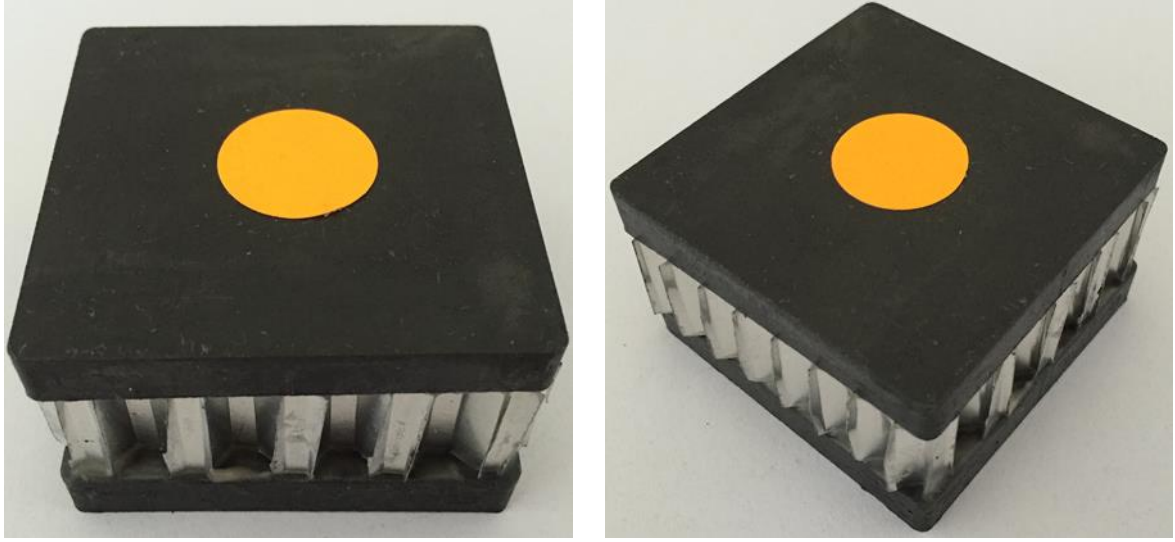


Şekil 9. Yapıştırıcının plaka yüzeylerine uygulanması

Sandviç yapı konstrüksiyonunda, plakaların seramik-zengin yüzeyleri çarpma yüzeyi olarak konumlandırılmıştır (Şekil 10). İyi bir yapışma elde etmek için numuneler yapıştırıcının kürlenme süresince düşük basınç altında tutulmuştur. Yapıştırılmış bir sandviç yapı numunesi Şekil 11’ de gösterilmiştir.



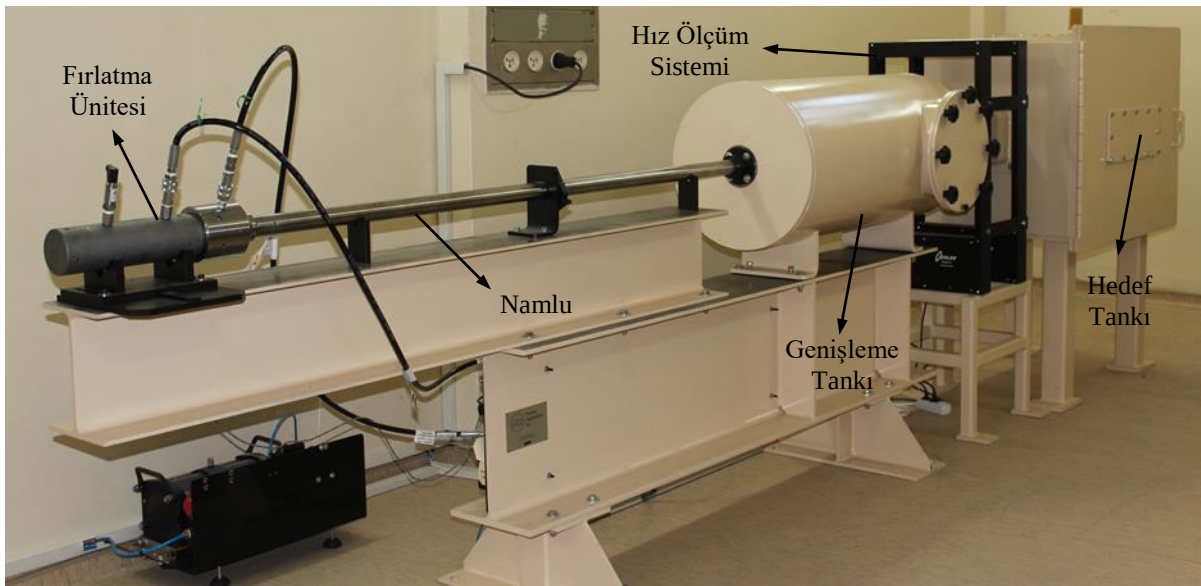
Şekil 10. Sandviç yapı konstrüksiyonunda yüzey plakalarının konumlandırılma şekli



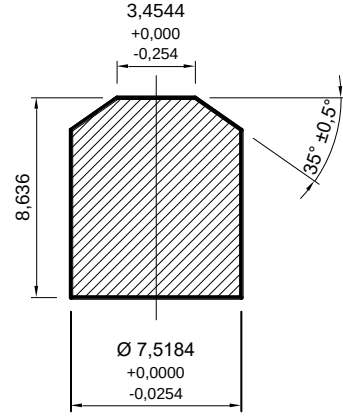
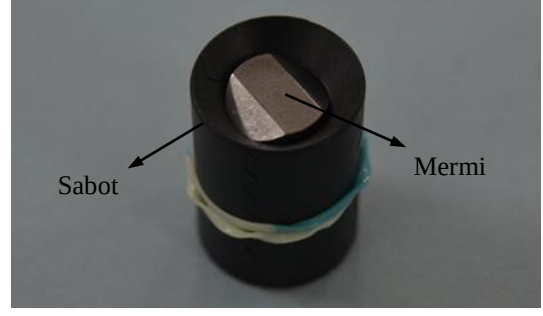
Şekil 11. Üretilmiş bir sandviç yapı numunesi

3.2.3. Balistik Test Sistemi

Balistik testler, Şekil 12’ de gösterilen tek kademeli gaz silah sistemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Testlerde, MIL-DTL-46593B (MR) w/AMENDMENT 1 standardında [19] tanımlanmış 0.30 kalibre parçacık benzetimli mermiler (FSP – Fragment Simulating Projectile) kullanılmıştır. Sistemin fırlatıcı ünitesi sabotlu kullanıma uygundur. Sabotlu fırlatıcı için 0.30 kalibre parçacık benzetimli mermilerin geometrik boyutları Şekil 13’ de verilmiştir. Testlerde kullanılan mermiler, AISI4340 çeliğinden üretilmiş, su verme ve temperleme işlemleri ile sertlikleri MIL-DTL-46593B (MR) w/AMENDMENT 1 standardına uygun olarak 30 ± 2 Rockwell C değerine getirilmiştir.

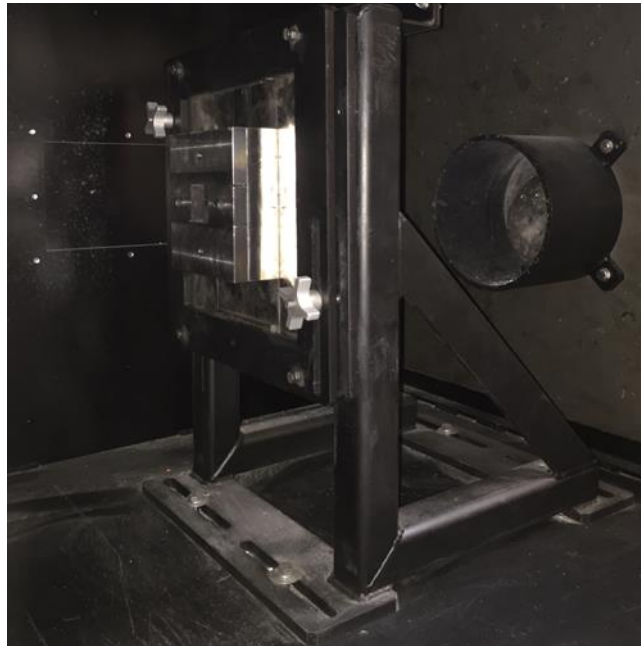


Şekil 12. Tek kademeli gaz silah sistemi



Şekil 13. Sabotlu fırlatıcı için parçacık benzetimli mermi ve geometrik detayları

Sandviç yapı numunelerinin atış alanında sabitlenmesi için Şekil 14’ de gösterilen numune bağlama aparatı kullanılmıştır. Bütün balistik testler, aynı şartlar altında gerçekleştirilmiş ve mermi hızları 605 ± 5 m/s olarak ölçülmüştür. Kullanılabilir test numunelerinden önce, optimum test şartları ve tekrarlanabilirlik açısından ön hazırlık numuneleri kullanılmıştır. Aynı tip numuneler için benzer hasar ve deformasyonlar gözlenmiştir.



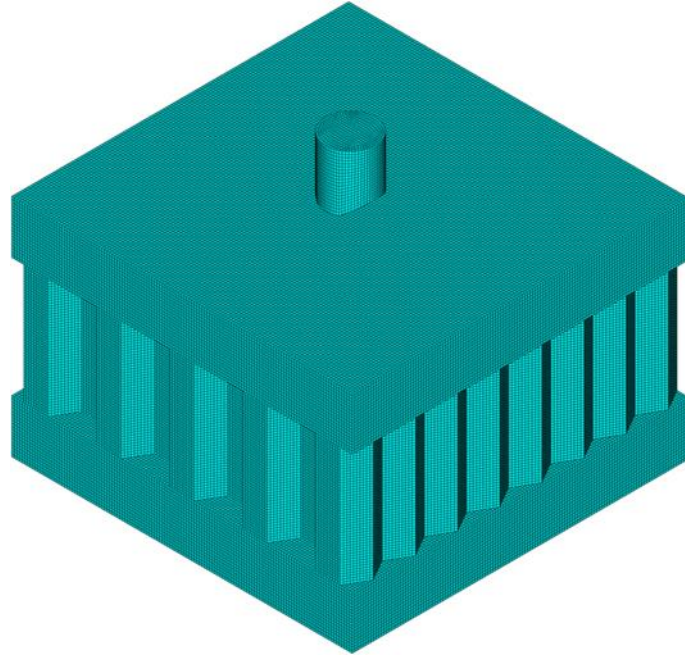
Şekil 14. Numune bağlama aparatı

3.3. Sayısal Modelleme

Balistik testlerin sayısal analizleri, LS-DYNA® eksplisit sonlu elemanlar yazılımı kullanılarak modellenmiştir. Fonksiyonel kademelendirilmiş malzemeler için geliştirilmiş özel bir malzeme modeli olmadığı için çarpma yükleri altında sayısal olarak modellenmesi oldukça karmaşık bir olaydır. Proje ekibi olarak, bu malzemelerin düşük ve yüksek hızlı çarpma yükleri altındaki davranışlarının sayısal modellenmesi üzerine yapılan deneysel-sayısal çalışmalar mevcuttur [18, 20]. Yapılan bu çalışmalarda, sünek davranış sergileyen metal-zengin bileşimler için belirli oranda başarı yakalanırken, gevrek davranış sergileyen seramik-zengin bileşimler için kabul edilebilir sonuçlar elde edilememiştir. Bu projede, proje ekibinin diğer çalışmalarına kıyasla, seramik-zengin bileşim için yeni bir yaklaşım denenmiştir.

Balistik testleri gerçekleştirilen numunelerden, metal-zengin ($n = 0.1$), lineer ($n = 1.0$) ve seramik-zengin ($n = 10.0$) bileşimler modellenmiştir. Fonksiyonel kademelendirilmiş yüzey plakalarını oluşturan katmanların içerdiği seramik oranına bağlı olarak, sünek veya gevrek olma durumlarına göre farklı malzeme modelleri kullanılmıştır. Bu doğrultuda, yüzey plakalarının metal-zengin katmanları için elastoplastik bir malzeme modeli, seramik-zengin katmanları için ise, seramik bir malzeme modeli kullanılmıştır. Proje ekibinin edindiği tecrübeye ve Templeton vd. [11] yaptığı çalışmaya göre, seramik içeriği %60 ve üzerinde olan katmanlar için seramik malzeme modeli kullanılmıştır. Seramik içeriği %60' ın altında olan ve elastoplastik malzeme modeli ile tanımlanan katmanlar için temelde tek eksenli gerilme-şekil değiştirme eğrileri kullanılmıştır. Bu katmanların mekanik ve elastoplastik özellikleri sırasıyla, Mori-Tanaka şeması [21, 22] ve TTO (Tamura-Tomota-Ozawa) model [23] kullanılarak belirlenmiş ve kullanılan elastoplastik malzeme modeline adapte edilmiştir. Balistik test analizleri için oluşturulan sonlu elemanlar modeli Şekil 15' de gösterilmiştir. Problemin sonlu elemanlar modeli, 8 mm kalınlık ve 5 katmandan oluşan Al6061/B₄C fonksiyonel kademelendirilmiş yüzey plakaları ve 6.35 mm hücre boyutu, 18 mm çekirdek yüksekliği ve 70 mikron folyo kalınlığına sahip Al3003-H19 bal peteği çekirdek ile oluşturulmuş sandviç yapı ve 0.30 kalibre AISI4340 parçacık benzetimli çelik mermiden oluşmaktadır. Sandviç yapı elemanlarının ve mermi malzemesinin mekanik özellikleri Tablo 1' de verilmiştir. Fonksiyonel kademelendirilmiş yüzey plakaları, metal katmandan %75 seramik içerikli seramik-zengin katmana değişen şekilde modellenmiş ve seramik-zengin katman çarpma yüzeyi olarak konumlandırılmıştır. Yüzey plakalarının ve merminin sonlu elemanlar ağında, 8 düğüm noktalı

ve 9 serbestlik dereceli katı eleman ve bal peteğinin sonlu elemanlar ağında 4 düğüm noktalı ve 12 serbestlik dereceli kabuk eleman kullanılmıştır.



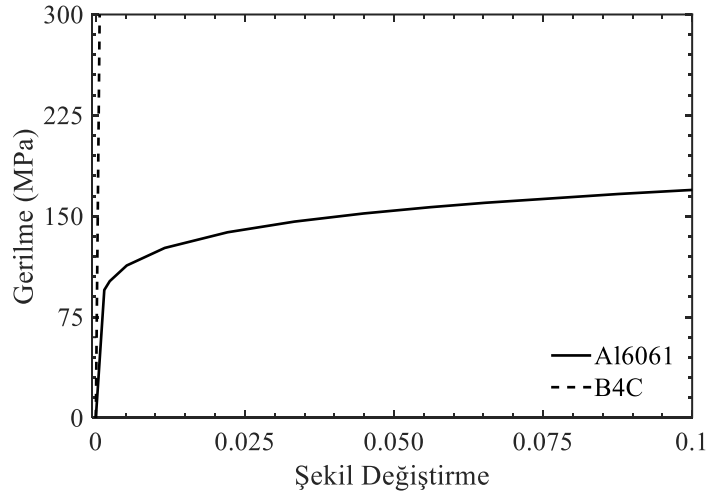
Şekil 15. Sandviç yapı ve merminin sonlu elemanlar modeli

Tablo 1. Sandviç yapı elemanlarının ve merminin malzeme özellikleri

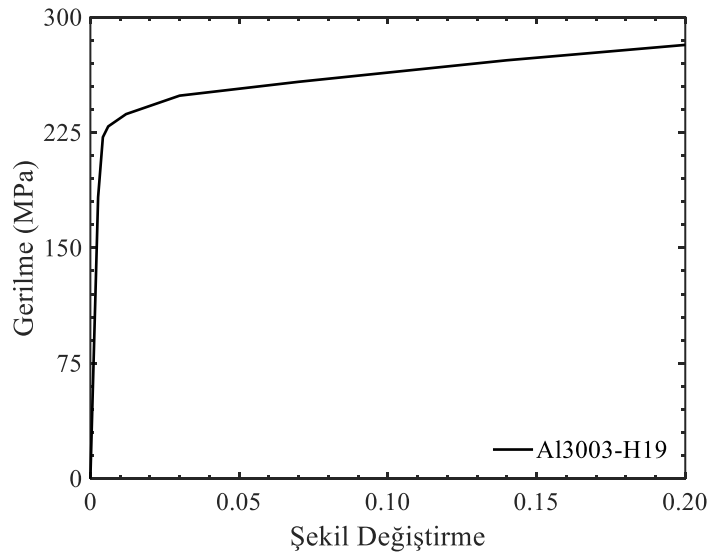
Malzeme parametreleri	Al6061	B ₄ C	Al3003-H19	AISI4340
Yoğunluk (kg/m ³)	2700	2510	2730	7850
Elastiklik modülü (GPa)	69	469	70	207
Poisson oranı	0.33	0.19	0.33	0.29
Akma gerilmesi (MPa)	95	-	183	1069
Tanjant modülü (GPa)	-	-	-	2
Kopma şekil değiştirmesi	0.6	-	0.52	0.77
Cowper-Symonds parametreleri				
C	65 000	-	270 000	200 000
p	4	-	8	3.3

Yüzey plakalarının metal-zengin katmanları, elastoplastik malzeme modeli MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY (MAT_024) ile modellenmiştir. Bu malzeme modeli için gerekli olan katmanların tek eksenli gerilme-şekil değiştirme eğrileri, TTO model kullanılarak elde edilmiştir. TTO modelde, katmanların gerilme-şekil değiştirme eğrilerinin elde edilmesi için bileşenlerin gerilme-şekil değiştirme eğrileri gereklidir. Şekil 16’ da metal bileşen için tek eksenli çekme testinden elde edilen gerilme-şekil değiştirme eğrisi verilmiştir ve seramik bileşen lineer-elastik olarak kabul edilmiştir. Bal peteği çekirdek malzemesinin

davranışı da aynı malzeme modeli ile tanımlanmış ve bal peteği malzemesinin gerilme-şekil değiştirme eğrisi Şekil 17’ de verilmiştir [24]. Merminin elastoplastik davranışı, Tablo 1’ de verilen mekanik özellikleri ile [25] farklı bir elastoplastik malzeme modeli olan MAT_PLASTIC_KINEMATIC (MAT_003) [26] kullanılarak modellenmiştir. Yüzey plakalarının seramik-zengin katmanları için seramik, cam ve diğer kırılğan malzemelerin modellenmesi için kullanışlı olan ve Johnson ve Holmquist tarafından [27] geliştirilen MAT_JOHNSON_HOLMQUIST_CERAMICS (MAT_110) malzeme modeli kullanılmıştır. Plakalarda kullanılan seramik bileşen B₄C için malzeme modelinde kullanılan parametreler Tablo 2’ de verilmiştir [28]. Ancak, seramik-zengin katmanlar modellenirken ilgili katmanın seramik oranına göre malzeme parametrelerinde uygun değişiklik ve kalibrasyon çalışmaları yapılmıştır.



Şekil 16. Plaka bileşenlerinin gerilme-şekil değiştirme eğrileri



Şekil 17. Bal peteği malzemesinin gerilme-şekil değiştirme eğrisi

Tablo 2. B4C için Johnson-Holmquist malzeme modeli parametreleri

Yoğunluk (kg/m ³)	G (GPa)	A	B	C	M	N
2510	197	0.927	0.7	0.005	0.85	0.67
EPS0	T (GPa)	SFMAX	HEL (GPa)	PHEL (GPa)	BETA	
1.0	0.26	0.2	19	8.71	1.0	
D1	D2	K1 (GPa)	K2 (GPa)	K3 (GPa)		
0.001	0.5	233	-593	2800		

G – Kayma modülü; A – Normalize başlangıç dayanım parametresi; B – Normalize kırılma dayanımı parametresi; C – Dayanım parametresi (şekil değiştirme hızı bağıllığı); M – Kırılma dayanım parametresi (basınç üssü); N – Başlangıç dayanım parametresi (basınç üssü); EPS0 – Yarı-statik şekil değiştirme hızı eşiği; T – Maksimum çekme basınç dayanımı; SFMAX – Maksimum normalize kırılma dayanımı; HEL – Hugoniot elastik limit; PHEL – Hugoniot elastik limitin basınç bileşeni; BETA – Hidrostatik enerjiye dönüştürülen elastik enerji kaybının fraksiyonu; D1 – Plastik şekil değiştirme kırılma parametresi; D2 – Plastik şekil değiştirme kırılma parametresi (üs); K1 – Birinci basınç katsayısı (Hacim modülü); K2 – İkinci basınç katsayısı; K3 – Üçüncü basınç katsayısı

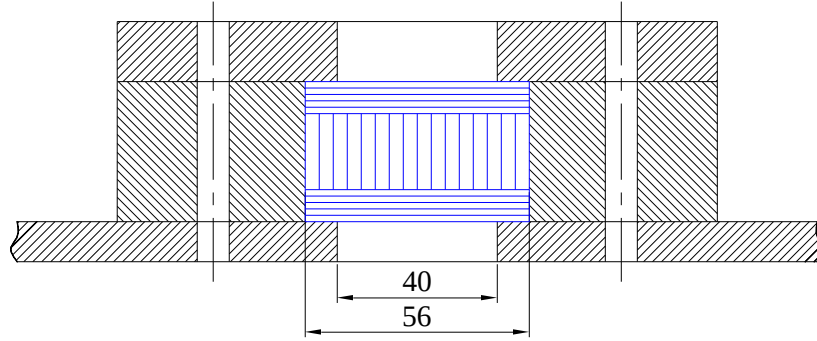
Balistik analizlerde şekil değiştirme hızının dikkate alınması oldukça önemli bir konudur. Sayısal modelde kullanılan MAT_110 malzeme modeli şekil değiştirme hızını dikkate alan bir modeldir ve detayları Tablo 2’ de verilmiştir. MAT_003 ve MAT_024 malzeme modellerinde ise, şekil değiştirme hızı Cowper-Symonds parametreleri [29] ile dikkate alınmıştır (Tablo 1).

Çarpma analizlerinde diğer bir önemli adım temas modelinin tanımlanmasıdır. Bu çalışmada, mermi ile sandviç yapı arasında CONTACT_ERODING_NODES_TO_SURFACE, çarpma esnasında oluşabilecek olası temaslar için CONTACT_ERODING_SINGLE_SURFACE ve plakalar ile bal peteği arasında CONTACT_TIED_NODES_TO_SURFACE_TIEBREAK temas algoritmaları kullanılmıştır. Sandviç yapı numuneleri hazırlanırken, yüzey plakaları ve bal peteği yapıştırıcı ile birleştirilmiştir. Ancak, sonlu elemanlar modelinde yapıştırıcıyı modellemek yerine yapışma bölgesinin tanımlanabilmesi ve oluşabilecek ayrılmaları modelleyebilmek için TIEBREAK temas algoritması kullanılmıştır. TIEBREAK temas algoritması tanımlandığı yüzeydeki düğüm noktalarını belli bir kuvvet değerine kadar birbirine bağlamaktadır. Ara yüzeyde oluşan kuvvet, kopma değerini geçtiği zaman ayrılma meydana gelmektedir. Bu temas algoritmasında, bal peteğinin yapışma ara yüzeyindeki düğüm noktaları, yüzey plakalarına tanımlanan bir ayrılma kriteri ile bağlanmıştır. TIEBREAK temas algoritması, kopma kuvvetlerini esas alan bir temas modeli olup, ayrılma aşağıdaki denkleme göre gerçekleşir:

$$\left(\frac{|f_n|}{f_{n,kopma}}\right)^{m_1} + \left(\frac{|f_s|}{f_{s,kopma}}\right)^{m_2} \geq 1 \quad (5)$$

Burada; f_n normal yöndeki kuvveti, $f_{n,kopma}$ normal yöndeki kopma kuvvetini, m_1 normal yöndeki kuvvet üssünü, f_s kayma yönündeki kuvveti, $f_{s,kopma}$ kayma yönündeki kopma kuvvetini, m_2 kayma yönündeki kuvvet üssünü göstermektedir. Araldite® 2015 yapıştırıcı için normal ve kayma yönlerindeki kopma gerilmeleri sırasıyla 21.63 MPa and 17.90 MPa olarak dikkate alınmıştır [30]. Normal ve kayma yönündeki kopma kuvvetleri, birleşme yüzey alanı dikkate alınarak normal ve kayma yönündeki kopma gerilmelerinden hesaplanmış ve temas algoritmasına uygulanmıştır.

Problemin sınır şartı, şematik olarak Şekil 18’ de gösterilen ve testlerde kullanılan bağlantı aparatı dikkate alınarak sayısal modele uygulanmıştır. Sayısal analizler, testlerde ölçülen ortalama 605 m/s için gerçekleştirilmiştir.



Şekil 18. Numune bağlama aparatının şematik görüntüsü ve sınır şartları

4. BULGULAR

4.1. Balistik Test Sonuçları

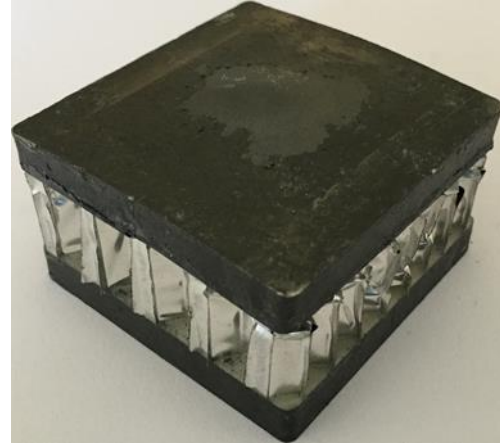
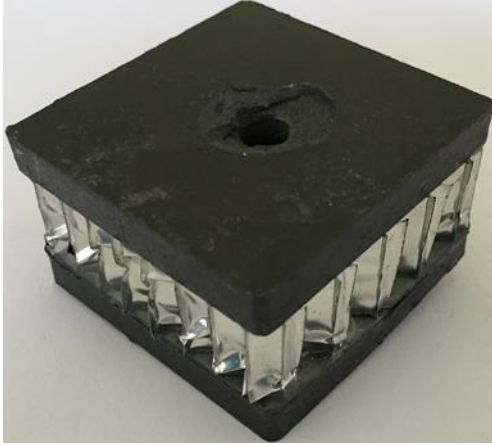
Al/B₄C fonksiyonel kademelendirilmiş plakalar ile desteklenmiş alüminyum bal peteği sandviç yapıların balistik performansı, plakaların beş farklı malzeme bileşimi için araştırılmıştır.

Mermi, bütün numuneler için alt yüzey plakasında durdurulmuştur. Şekil 19, numunelerin ön ve arka yüzeyinde oluşan hasar ve deformasyonları göstermektedir. Numunelerin genel dış görüntülerinden, ön yüzeyde başlangıç dalga yansımasından dolayı bölgesel parçalanma ve arka yüzeyde şişme meydana geldiği görülmektedir. Üst plakanın ön yüzeyinde oluşan bölgesel parçalanma, plakaların mekanik direncine bağlı olarak malzeme bileşiminin metal-zenginden seramik-zengine değişmesiyle azalmıştır. Çarpma olaylarında, çarpmanın etkisiyle şok dalgası oluşur ve numune kalınlığı boyunca hareket eder. Bu şok dalgasının bir kısmı yansır bir kısmı ise iletilir. İletilen şok dalgası, eğilmenin de etkisiyle numune arka yüzeyinde çekme gerilmesi

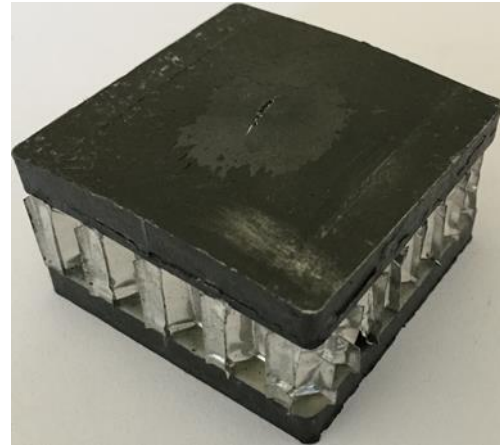
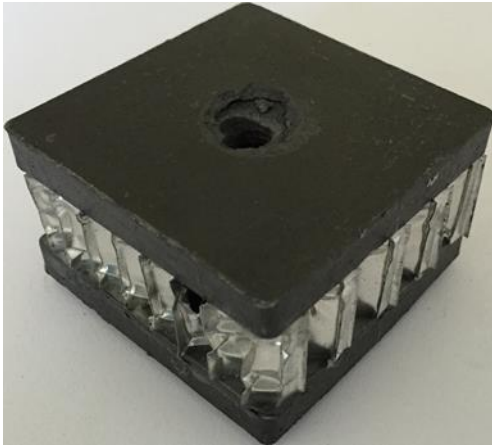
oluşturur. Oluşan çekme gerilmesi, malzemenin çekme dayanımından büyükse, malzemenin arka yüzeyinde çatlak veya hasar oluşumu başlar. Buna göre, $n = 0.5$ ve $n = 1.0$ bileşimine sahip numunelerin arka yüzeylerinde yanal çatlak oluşumu gözlenmiştir. $n = 1.0$ bileşimi için oluşan çatlak, $n = 0.5$ bileşimine göre daha küçüktür ve hatta görülebilecek kadar büyük değildir.

ÖN YÜZ

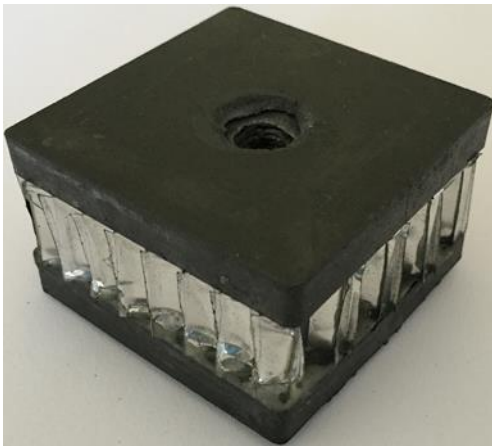
ARKA YÜZ



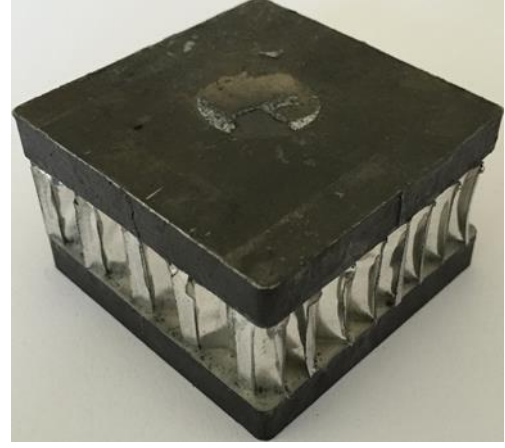
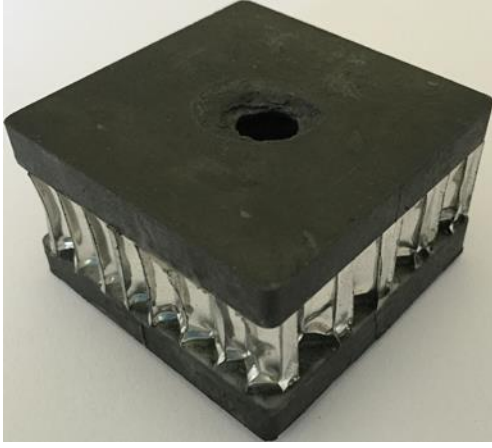
(a) $n = 0.1$



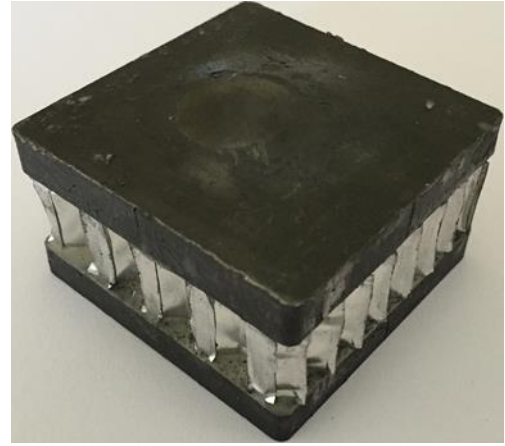
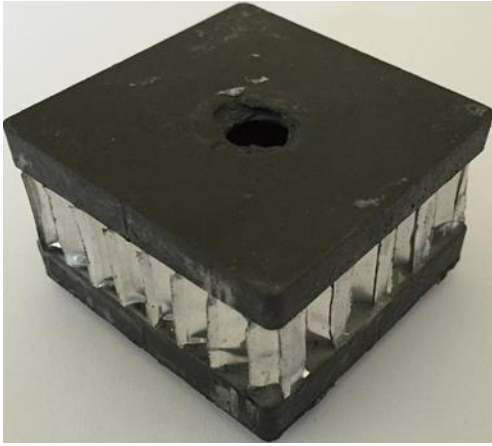
(b) $n = 0.5$



(c) $n = 1.0$



(d) $n = 5.0$



(e) $n = 10.0$

Şekil 19. Numunelerin ön ve arka yüzeylerinde oluşan hasar ve deformasyonlar

Numunelerin iç kısmında oluşan hasar ve deformasyonları değerlendirebilmek için numuneler epoksi reçine ile kaplanmış ve ortadan ikiye kesilmiştir (Şekil 20). İlk olarak, farklı malzeme bileşimine sahip plakalar ile oluşturulan numunelerin, farklı hasar ve deformasyon mekanizmaları gösterdiği söylenebilir. Genel olarak, $n = 0.1$, $n = 0.5$ ve $n = 1.0$ bileşimleri sünek hasar ve deformasyon sergilerken, $n = 5.0$ ve $n = 10.0$ bileşimleri gevrek hasar oluşumu göstermiştir.

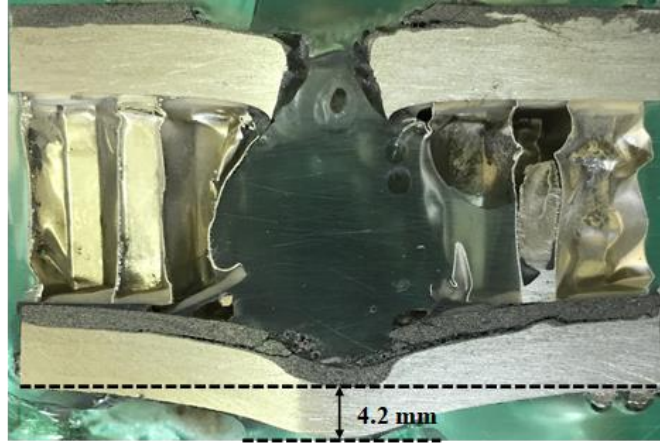
$n = 0.1$, $n = 0.5$ ve $n = 1.0$ bileşimleri için üst plakalar genel olarak sünek davranış göstermiş ve bu plakalarda sünek delik genişlemesi gerçekleşmiştir. Bunun yanı sıra, $n = 1.0$ bileşiminin az oranda yarı-kırılgan davranış gösterdiği söylenebilir. Çünkü, Şekil 20-(c)' den de görüleceği gibi, ikinci katmanda konik çatlak oluşumu başlamıştır. Ancak, alt katmanlar sünek yapıları sayesinde çatlak ilerlemesini engellemişlerdir. $n = 0.1$, $n = 0.5$ ve $n = 1.0$ bileşimlerinin üst plakaları için çarpma bölgesine yakın kısımlarda, ilk katmanın (%75B₄C-%25Al6061) ayrıldığı gözlenmiştir. $n = 5.0$ ve $n = 10.0$ bileşimleri için üst plakada konik kırılma ve parçalanma

oluşturmuştur. Bu kırılma, gevrek malzemeler için tipik bir hasar türüdür. Konik kırılma, temas bölgesinin dış çevresinde oluşan Hertzian gerilme dağılımının bir sonucudur [31, 32]. Üst plakalarda oluşan konik kırılmadan sonra, kırılan parçaların ve merminin ileri momentumundan kaynaklanan eğilme momenti, metal katmanda yapraklanma oluşturmuştur.

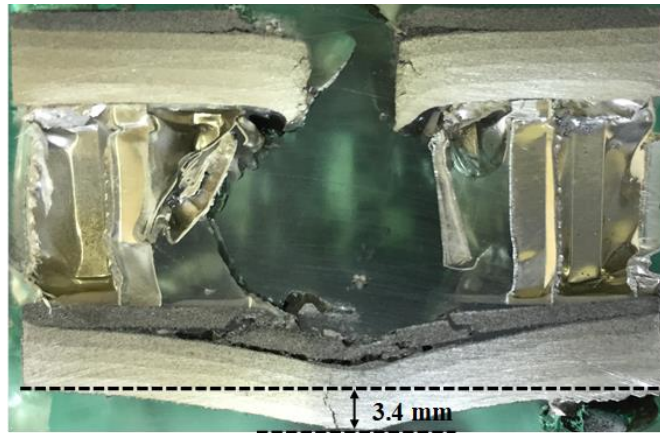
Bütün numuneler mermiyi alt plakada durdurmayı başarmış ve numunelerin arka yüzeylerinde şişme meydana gelmiştir. Numune arka yüzeylerinde oluşan şişme değerleri, metal-zengin bileşimden seramik-zengin bileşime sırasıyla, 4.2 mm, 3.4 mm, 3.1 mm, 1.5 mm ve 4.4 mm’ dir. Şişme etkisi, plakalardaki seramik oranının artmasıyla azalmıştır. Ancak, $n = 10.0$ bileşimi delinmek üzere olduğundan bu değerlendirmenin dışında tutulmuştur. $n = 10.0$ bileşimi için üst plakaya benzer şekilde, alt plakada da konik kırılma oluşmuştur ve kırılan koni merminin ileri momentumundan dolayı metal katmanı deforme etmiştir. Bu sebeple, metal katman Şekil 20-(e)’ de gösterilen noktalarda bir plastik mafsal etkisi göstermiş ve plastik deformasyon kabiliyeti ile delinmeyi engellenmiştir. $n = 5.0$ bileşiminin alt plakası için mermi üst yüzeyde bir batma derinliği oluşturmuş ve plakanın iç kısmında konik kırılma meydana gelmiştir. $n = 5.0$ bileşiminin, $n = 10.0$ bileşimine göre daha tok bir yapıya sahip olmasından dolayı tam bir konik kırılma gerçekleşmemiştir. $n = 0.1$, $n = 0.5$ ve $n = 1.0$ bileşimlerinin alt plakaları, genel olarak eğilme deformasyonu sergilemişlerdir. $n = 0.5$ bileşimi için alt plakada oluşan yanal çatlak, aynı zamanda eksenel yönde de ilerlemiştir. Ayrıca, bu bileşimlerin alt plakaları için katmanlar arasındaki mekanik empedans farkına (ani bileşim değişimi) bağlı olarak oluşan dalga yansımasının sonucu birinci ve ikinci katmanlar arasında delaminasyon meydana gelmiştir. $n = 1.0$ bileşimi en yumuşak bileşim değişimine sahip olduğu için en az delaminasyon bu malzeme bileşiminde meydana gelmiştir.

Bal peteği çekirdek malzemesi, bütün plaka tipleri için delinmiştir. Ayrıca, bal peteğinde, hücre duvarlarının burkulması ve yanal ezilme şeklinde iki farklı deformasyon tipi meydana gelmiştir. Plastik burkulma, merminin eksenel sıkıştırma etkisi ve alt plakanın eğilmesi nedeniyle oluşmuştur. Eğilme etkisi, sünek yapılarından dolayı $n = 0.1$, $n = 0.5$ ve $n = 1.0$ bileşimlerinde gözlenmiştir. Bal peteğinin ezilmesi, oluşan şok dalgasının yanal yönde ilerlemesi sonucu meydana gelmiştir. Şok dalgasının yanal yönde ilerlemesi, plaka bileşimine bağlı olarak değişmiş ve bal peteğinin deformasyonunu etkilemiştir. Şekil 20’ den görüleceği gibi, bal peteğinin yanal ezilmesi, metal-zengin bileşimden seramik-zengin bileşime artmıştır. Bu durum, plakaların mekanik empedansları ile ilgilidir. Plakaların mekanik empedansları, seramik oranı arttıkça artmaktadır. Yani, metal-zengin bileşimlerde lokal plastik deformasyon

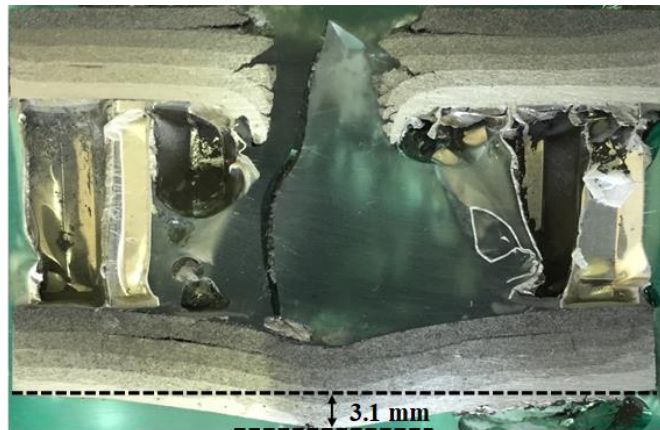
oluşurken, seramik-zengin bileşimlerde çarpma etkisi geniş bir alana yayılmıştır. Metal-zengin bileşimler için yansıyan şok dalgasının seviyesi azalmakta ve kalınlık boyunca iletilen şok dalgası, merminin nüfuziyetine ve alt plakanın eğilmesine katkıda bulunmaktadır. Seramik-zengin bileşimler için ise, oluşan şok dalgasının büyük bir kısmı numune içine yansımakta ve bu durum bal peteği üzerinden daha fazla ezilme oluşturmaktadır.



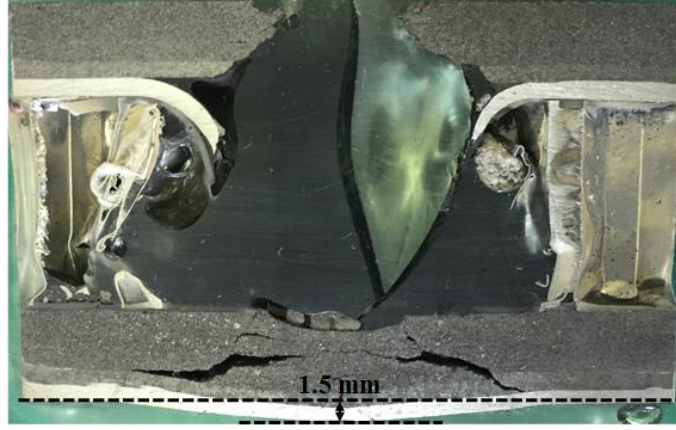
(a) $n = 0.1$



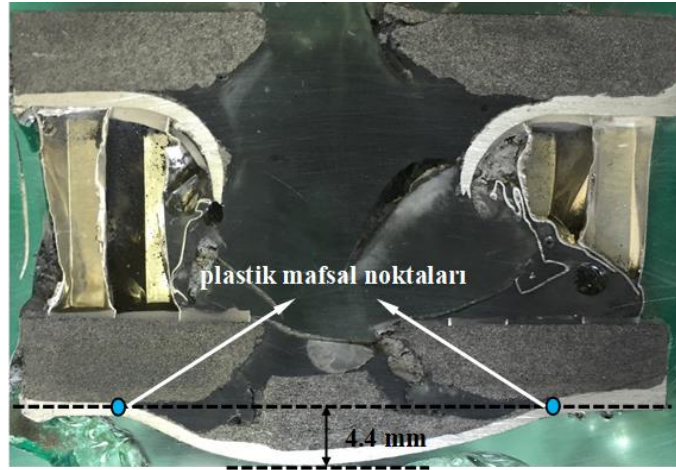
(b) $n = 0.5$



(c) $n = 1.0$



(d) $n = 5.0$



(e) $n = 10.0$

Şekil 20. Balistik test sonrası numunelerin kesit görünüşleri

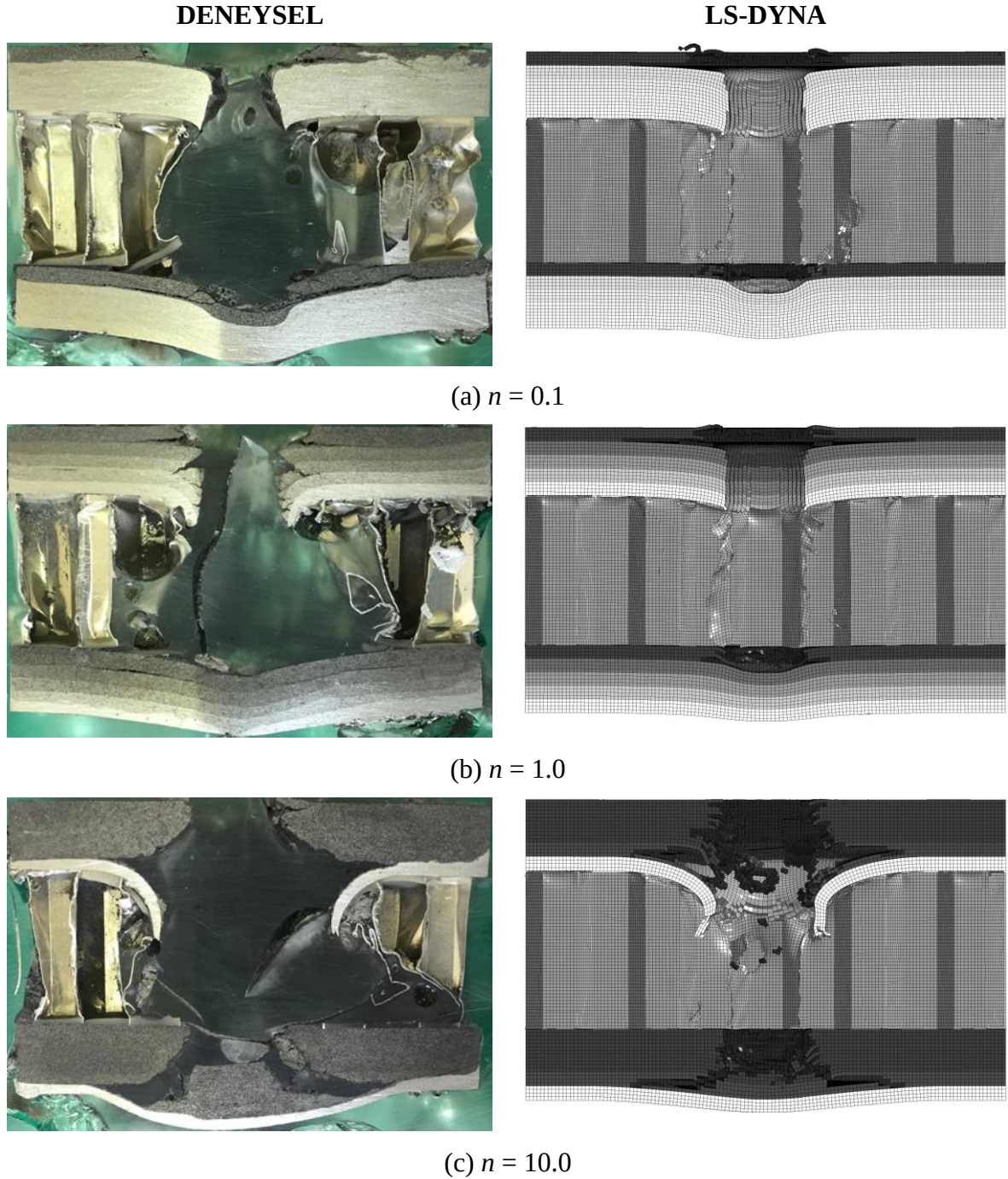
4.2. Sayısal Analiz Sonuçları

Sayısal analizler, temel olarak, metal-zengin ($n = 0.1$), lineer ($n = 1.0$) ve seramik-zengin ($n = 10.0$) bileşimler için gerçekleştirilmiştir. Sayısal modelleme kısmı, projenin temel araştırma konusu olmadığı ve halen devam eden bir çalışma olduğu için burada detaylı olarak incelenmemiştir.

Balistik test ve sayısal analiz sonuçları, sandviç yapı numunelerinin kesit görünüşleri üzerinden karşılaştırılmalı olarak Şekil 21’ de gösterilmiştir. Fonksiyonel kademelendirilmiş yüzey plakalarının sayısal modellenmesinde kullanılan yaklaşım genel olarak başarılı bir sonuç vermiştir. Plaka katmanlarının içerdiği seramik oranına göre seçilen malzeme modelleri, numunelerin deneysel olarak sergilediği sünek veya kırılkan davranışı, sayısal analizlerde başarılı bir şekilde modellemiştir. Şöyle ki, metal-zengin ($n = 0.1$) ve lineer ($n = 1.0$) bileşime sahip numunelerin deneysel sonuçlarına benzer şekilde, üst plakalarda sünek delik genişlemesi

ve alt plakaların arka yüzeyinde şişme meydana gelmiştir. Ayrıca, üst plakaların seramik-zengin katmanlarında ayrılmalar oluşmuştur. Seramik-zengin ($n = 10.0$) bileşime sahip numunede oluşan konik kırılma, parçalanma, üst plakanın metal katmanında oluşan yapraklanma ve alt plakada oluşan plastik mafsallık etkisi başarılı bir şekilde modellenmiştir.

Sonuç olarak, sayısal analiz sonuçları bu aşamada balistik test sonuçları ile numunelerin hasar ve deformasyon mekanizmaları açısından uyumlu sonuçlar vermiştir.



Şekil 21. Numunelerin karşılaştırmalı deneysel ve sayısal kesit görüntüleri

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu projede, toz istifleme-sıcak presleme yöntemi ile üretilen Al/B₄C fonksiyonel kademelendirilmiş yüzey plakalarının üretim şartlarının iyileştirilmesi ve üretilen plakalar ile alüminyum bal peteğinden oluşan sandviç yapının balistik performansı deneysel ve sayısal olarak araştırılmıştır. Yüzey plakaları, vakum ve atmosfer kontrollü bir sıcak pres ünitesi kullanılarak metal-zengin, lineer ve seramik-zengin bileşimler için üretilmiştir. Balistik testler, 0.30 kalibre parçacık benzetimli çelik mermiler kullanılarak tek kademeli gaz silah sistemi ile gerçekleştirilmiştir. Balistik test sonuçları, yüzey plakalarının seramik içeriğindeki değişimin, sandviç yapının hasar modları ve mekanizmaları, enerji sönümleme kabiliyeti ve çarpma direnci üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Plakaların metal-zengin bileşimlerinde lokal plastik deformasyon oluşurken, seramik-zengin bileşimlerinde çarpma yükü geniş bir alana yayılmıştır. Yüzey plakalarının seramik oranındaki artış, numunelerin arka yüzeyindeki şişme etkisini azaltmıştır. Bal peteği çekirdek malzemesi, hücre duvarlarının plastik burkulması ve yanal ezilme deformasyonları ile sandviç yapının enerji sönümleme kabiliyetine katkıda bulunmuştur. Sandviç yapı numunelerinin sayısal modeli, LS-DYNA® sonlu elemanlar yazılımı kullanılarak geliştirilmiştir. Sayısal modelde, fonksiyonel kademelendirilmiş yüzey plakalarını oluşturan katmanların içerdiği seramik oranına bağlı olarak, plaka davranışının sünek veya gevrek olma durumuna göre farklı malzeme modelleri kullanılmıştır. Sayısal analiz sonuçları, balistik test sonuçları ile sandviç yapı numunelerinin hasar ve deformasyon mekanizmaları açısından uyumlu sonuçlar göstermiştir.

KAYNAKLAR

1. Fatt, M.S.H., Park, K.S., 2000. Perforation of honeycomb sandwich plates by projectiles. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, 31 (8): 889-899.
2. Ryan, S., Schaefer, F., Riedel, W., 2006. Numerical simulation of hypervelocity impact on CFRP/Al HC SP spacecraft structures causing penetration and fragment ejection. **International Journal of Impact Engineering**, 33 (1-12): 703-712.
3. Ryan, S., Schaefer, F., Destefanis, R., Lambert, M., 2008. A ballistic limit equation for hypervelocity impacts on composite honeycomb sandwich panel satellite structures. **Advances in Space Research**, 41 (7): 1152-1166.
4. Sibeaud, J.M., Thamié, L., Puillet, C., 2008. Hypervelocity impact on honeycomb target structures: Experiments and modeling. **International Journal of Impact Engineering**, 35 (12): 1799-1807.

5. Schonberg, W., Schäfer, F., Putzar, R., 2010. Hypervelocity impact response of honeycomb sandwich panels. **Acta Astronautica**, **66** (3-4): 455-466.
6. Buitrago, B.L., Santiuste, C., Sánchez-Sáez, S., Barbero, E., Navarro, C., 2010. Modelling of composite sandwich structures with honeycomb core subjected to high-velocity impact. **Composite Structures**, **92** (9): 2090-2096.
7. Feli, S., Pour, M.H., 2012. An analytical model for composite sandwich panels with honeycomb core subjected to high-velocity impact. **Composites Part B: Engineering**, **43** (5): 2439-2447.
8. Liu, P., Liu, Y., Zhang, X., 2015. Internal-structure-model based simulation research of shielding properties of honeycomb sandwich panel subjected to high-velocity impact. **International Journal of Impact Engineering**, **77**: 120-133.
9. Chin, E.S.C., 1999. Army focused research team on functionally graded armor composites. **Materials Science and Engineering: A**, **259** (2): 155-161.
10. Petterson, A., Magnusson, P., Lundberg, P., Nygren, M., 2005. Titanium–titanium diboride composites as part of a gradient armour material. **International Journal of Impact Engineering**, **32** (1-4): 387-399.
11. Templeton, D.W., Gorsich, T.J., Holmquist, T.J., 2007. Computational study of a functionally graded ceramic-metallic armor, pp. 1155-1163. *23rd International Symposium on Ballistics*, April 16-20, Tarragona, Spain.
12. Johnson, G.R., Holmquist, T.J., Beissel, S.R., 2003. Response of aluminum nitride (including a phase change) to large strains, high strain rates, and high pressure. **Journal of Applied Physics**, **94** (3): 1639-1646.
13. Johnson, G.R., Cook, W.H., 1983. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures, pp. 541-547. *7th International Symposium on Ballistics*, April 19-21, The Hague, The Netherlands.
14. Eghtesad, A., Shafiei, A.R., Mahzoon, M., 2012. Study of dynamic behavior of ceramic-metal FGM under high velocity impact conditions using CSPM method. **Applied Mathematical Modelling**, **36**: 2724-2738.
15. Huang, C.Y., Chen, Y.L., 2016. Design and impact resistant analysis of functionally graded $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$ ceramic composite. **Materials & Design**, **91**: 294-305.
16. Aydin, M., Apalak, M.K., 2016. Experimental damage analysis of Al/SiC functionally graded sandwich plates under ballistic impact. **Materials Science and Engineering: A**, **671**: 107-117.

17. Gunes, R., Arslan, K., Apalak, M.K., Reddy, J.N., 2017. Ballistic performance of honeycomb sandwich structures reinforced by functionally graded face plates. **Journal of Sandwich Structures and Materials**, In Press.
18. Arslan, K., Gunes, R., Apalak, M.K., Reddy, J.N., 2017. Experimental tests and numerical modeling of ballistic impact on honeycomb sandwich structures reinforced by functionally graded plates. **Journal of Composite Materials**, In Press.
19. MIL-DTL-46593B (MR) w/AMENDMENT 1, August 2008. Projectile, calibers .22, .30, .50 and 20 mm fragment-simulating.
20. Gunes, R., Aydin, M., Apalak, M.K., Reddy, J.N., 2014. Experimental and numerical investigations of low velocity impact on functionally graded circular plates. **Composites Part B: Engineering**, **59**: 21-32.
21. Mori, T., Tanaka, K., 1973. Average stress in matrix and average elastic energy of materials with misfitting inclusions. **Acta Metallurgica**, **21** (5): 571-574.
22. Benveniste, Y., 1987. A new approach to the application of Mori-Tanaka's theory in composite materials. **Mechanics of Materials**, **6** (2): 1310-1320.
23. Tamura, I., Tomota, Y., Ozawa, M., 1973. Strength and ductility of Fe-Ni-C alloys composed of austenite and martensite with various strength, pp. 611-615. *Proceedings of the Third Conference on Strength of Metals and Alloys*, August, Cambridge, England.
24. Tryland, T., 2005. Alternative model of the offset deformable barrier, pp. B-II/33-40. *4rd German LS-DYNA Forum*, October 14-15, Bamberg, Germany.
25. Gama, B.A., Bogetti, T.A., Fink, B.K., Yu, C.J., Claar, T.D., Eifert, H.H., Gillespie Jr, J.W., 2001. Aluminum foam integral armor: a new dimension in armor design. **Composite Structures**, **52** (3-4): 381-395.
26. Kreig, R.D., Key, S.W., 1976. Implementation of a time dependent plasticity theory into structural computer programs 125-137. *In: Constitutive Equations in Viscoplasticity: Computational and Engineering Aspects* (Eds. J.A. Stricklin, K.J. Saczalski). ASME, New York.
27. Johnson, G.R., Holmquist, T.J., 1993. An improved computational model for brittle materials, pp. 981-984. *High-Pressure Science and Technology*, June 28 - July 2, Colorado, USA.
28. Johnson, G.R., Holmquist, T.J., 1999. Response of boron carbide subjected to large strains, high strain rates and high pressures. **Journal of Applied Physics**, **85** (12): 8060-8073.

29. Jones, N., 1983. Structural aspects of ship collisions, 308-337. *In: Structural Crashworthiness* (Eds. N. Jones, T. Wierzbicki). Butterworths, London.
30. da Silva, L.F.M., da Silva, R.A.M., Chousal, J.A.G., Pinto, A.M.G., 2008. Alternative methods to measure the adhesive shear displacement in the thick adherend shear test. **Journal of Adhesion Science and Technology**, 22 (1): 15-29.
31. Frank, F.C., Lawn, B.R., 1967. On the theory of Hertzian fracture. **Proceedings of the Royal Society of London A**, 299 (1458): 291-306.
32. Lawn, B., Wilshaw, R., 1975. Indentation fracture: principles and applications. **Journal of Material Science**, 10 (6):1049-1081.