

FONKSİYONEL KADEMELENDİRİLMİŞ DAİRESEL PLAKALARIN DÜŞÜK HIZLI DARBE ANALİZİ

Recep GÜNEŞ^{*1}, M. Kemal APALAK¹ Murat AYDIN² ve J.N. REDDY³

¹Erciyes Üniversitesi, Makina Mühendisliği Bölümü, 38039 Kayseri, TÜRKİYE
recep@erciyes.edu.tr

²Erciyes Üniversitesi, Sivil Havacılık Yüksek Okulu, 38039 Kayseri, TÜRKİYE

³Texas A&M University, Department of Mechanical Engineering, College Station, TX 77843-3123, USA

ÖZET

Bu çalışmada, fonksiyonel kademelendirilmiş dairesel plakaların düşük hızlı çarpma yükleri altındaki elasto-plastik davranışlarının teorik ve deneysel olarak belirlenmesi amaçlanmıştır. Kademelendirilmiş bölgedeki lokal malzeme özelliklerinin hesaplanmasında mikromekanik model olarak Mori-Tanaka şeması kullanıldı. Elasto-plastik analizlerde fonksiyonel kademelendirilmiş malzemelerin elasto-plastik davranışlarını modelleyebilen TTO model kullanıldı. Sayısal analizler için sonlu elemanlar metodu kullanıldı ve sonlu elemanlar metodu problemimize LS-DYNA sonlu elemanlar yazılımı yardımı ile uygulandı. Daha sonra, deneysel olarak katmanlama yöntemiyle üretilen farklı kompozisyonel gradyanlara sahip fonksiyonel kademelendirilmiş dairesel plakaların düşük hızlı darbe dayanım testleri yapıldı ve aynı şartlarda elde edilen teorik ve deneysel veriler mukayese edildi.

ABSTRACT

In this study, elasto-plastic behaviors of functionally graded circular plates were investigated under low velocity impact loads both numerically and experimentally. The locally effective material properties were evaluated using homogenization method that is based on the Mori-Tanaka scheme. The TTO (Tamura-Tomota-Ozawa) model which relates the uniaxial stress and strain of a two phase composite to the corresponding average uniaxial stresses and strains of the two constituent materials were used for the elasto-plastic analysis. A finite element program LS-DYNA was used for the numerical analysis. After, functionally graded circular plates have different material compositions were manufactured with powder stacking method, and then low speed impact tests were carried out. Experimental results were compared to numerical results in order to improve the numerical model.

1. Giriş

Mühendislik uygulamalarında dışarıdan gelebilecek darbelere karşı istenmeyen sonuçların

ortaya çıkmaması için, malzemenin gerekli en uygun cevabı veya davranışı verebilmesi istenir. Uygulama yerine ve kullanım amacına göre malzemenin maruz kalabileceği darbeler farklı şekillerde olabilir. Buna karşın darbeye karşı olan cevap da malzemenin kendisi tarafından belirlenir. Şöyle ki, metal ve metal alaşımlarının darbeye karşı cevabı; elastik uzama ve plastik şekil değiştirme şeklinde meydana gelir ve darbe hasarı, çoğunlukla , çarpma yüzeyinde başladığı anda kolay bir şekilde tespit edilebilir. Darbe hasarı, metal malzemelerde genellikle bir tehlike işareti olarak kabul edilmez, çünkü; metaller plastik şekil değiştirebilme kabiliyetlerinden dolayı, büyük miktarda enerjiyi absorbe edebilirler. Metaller sabit bir gerilme durumunda yapı sertleşmeden önce çok büyük uzamalarda akabilirler, bu nedenle oluşacak kopmalar ani ve beklenmedik olmaz. Buna karşın kompozit malzemelerde bir darbe sonucunda oluşan hasar, çarpmanın türüne göre darbeye maruz kalmayan yüzeyde meydana gelebilir, iç yapıda oluşan delaminasyonlar (tabakalar arasında ayrılma) şeklinde başlayabilir. Yukarıda da bahsedildiği gibi metallerde darbe cevabı, plastik şekil değiştirme sonucunda bir kopma şeklinde olmasına rağmen, kompozitler çok değişik modlarda hasara uğrayabilirler ve bu hasar modlarında parçanın yapısal bütünlüğünde ciddi bir değişiklik meydana gelmez. Genellikle gözle görülmeyen veya çok zayıf bir şekilde görülebilen hasarlar meydana gelebilir. Darbe esnasında kompozit malzemeye aktarılabilecek enerjinin miktarı, malzemenin bu enerjiyi sönmüleyebilmesi için oluşacak hasar modlarını belirleyecektir. Bu nedenle kompozit malzemede darbenin oluşturacağı hasarı tahmin etmek için darbe hızının belirlenmesi oldukça büyük bir öneme sahiptir [1].

Yapılan literatür çalışmasında yukarıda da detaylı olarak behsedildiği gibi katmanlı kompozit yapıların düşük hızlı çarpma davranışları konusunda pekçok çalışma [2-14] varken fonksiyonel kademelendirilmiş yapıların düşük hızlı darbe davranışları konusunda oldukça sınırlı sayıda çalışmanın olduğu görülmektedir. Gong ve arkadaşları [15] düşük hızlı çarpma nedeniyle fonksiyonel kademelendirilmiş silindirik kabukların dinamik tepkilerinin analitik çözümünü sundular. Apetre ve arkadaşları [16] ortası fonksiyonel kademelendirilmiş bir sandviç yapının düşük hızlı çarpma problemini çözdüler. Neticede verilen bir çarpma enerjisi için sandviç yapının orta kısmındaki maksimum şekil değiştirmenin önemli derecede azaltılabileceğini gösterdiler. Böylece, orta kısmı fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç yapılarda çarpma hasarının minimize edilebileceği sonucuna vardılar. Kubair ve Lakshmana [17] merkezde fonksiyonel kademelendirilmiş katmanlı kompozit kirişlerin düşük hızlı çarpma hasarını nümerik olarak incelediler. Hasarın başlaması ve ilerlemesini simüle etmek için karışık mod yapıştırıcı bölgesi modeli kullandılar. Yaptıkları parametrik simülasyonlar ile giriş merkezinde fonksiyonel kademelendirilmiş yapının kullanılmasıyla hasar enerjisinin değiştirilebileceği sonucuna vardılar.

Belirli bir pozisyonda malzeme kompozisyonunun sürekli olarak değiştiği yapılar olarak bilinen fonksiyonel kademelendirilmiş malzemeler (Functionally Graded Materials=FGMs) genellikle zor çalışma şartlarına sahip darbeli ortamlarda veya balistik amaçlı olarak kullanılabilirler. Bu nedenle bu malzemelerin darbe dayanımlarının belirlenmesi oldukça önemlidir. Bu çalışmada, farklı çarpma yüklerine maruz Al-SiC fonksiyonel kademelendirilmiş dairesel plakaların darbe davranışları teorik ve deneysel olarak incelenmiştir.

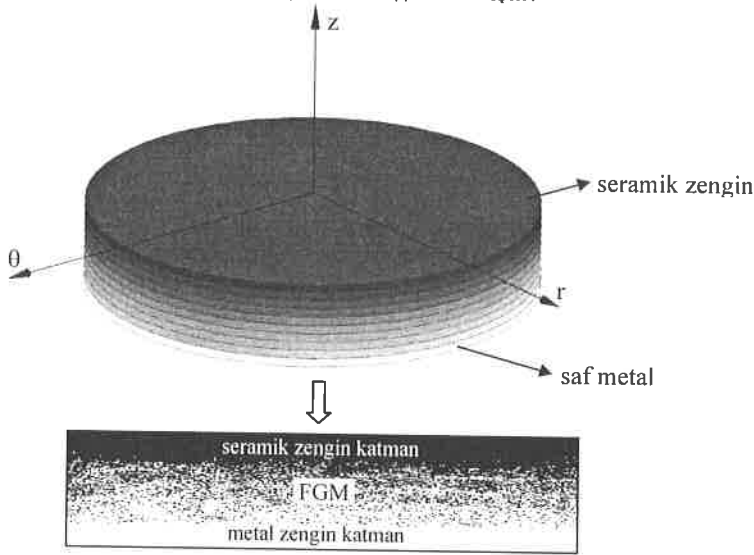
2. Teorik Model

Çalışmada yarı çapı $R = 0.02$ m. ve kalınlığı $h = 0.006$ m olan metal-seramik fonksiyonel kademelendirilmiş dairesel plaka kullanıldı (Şekil 1).

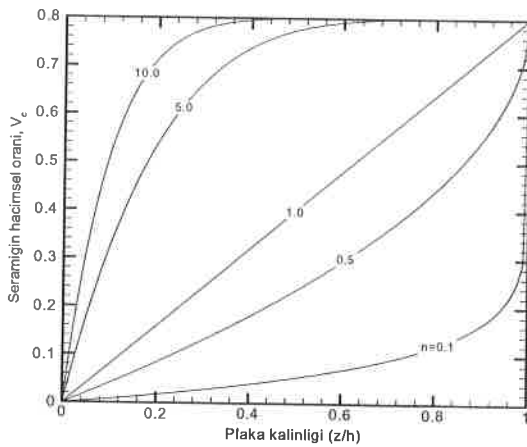
İki ayrı malzemeden (seramik-metal) oluşan plakanın en üst yüzeyinin seramik zengin, en alt yüzeyinin ise saf metal olduğu, her iki yüzey arasındaki hacimsel oranların kademeli olarak değiştiği kabul edilmiş ve bileşimin oranı plaka kalınlığı boyunca konumun fonksiyonu olarak, bir güç denklemi ile ifade edilmiştir:

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

Burada; $V_c(z)$ plakanın herhangi bir z mesafesindeki seramik bileşenin hacimsel oranı, h plakanın kalınlığı, n bileşimi lineer ve non-lineer olarak kontrol eden keyfi bir üstür. Çeşitli n değerleri için bileşimin hacimsel oranları Şekil 2’de gösterilmiştir.



Şekil 1. Fonksiyonel kademelendirilmiş dairesel plaka



Şekil 2. Fonksiyonel kademelendirilmiş plakanın çeşitli n değerleri için hacimsel bileşimi.

Kademelendirilmiş bölgedeki lokal malzeme özelliklerinin hesaplanmasında mikromekanik model olarak Mori-Tanaka [18,19] şeması kullanılmış olup bu, analitik çözümü imkansız kılarken sonlu elemanlar metodu ile çözüm bulunabilir. Bu nedenle fonksiyonel kademelendirilmiş plakaların düşük hızlardaki darbe dayanımları sonlu elemanlar metoduyla teorik olarak incelenmiştir. Fonksiyonel kademelendirilmiş malzemenin etkili hacim modülü K ve kayma modülü G Mori-Tanaka şemasına göre şu şekilde ifade edilir;

$$\frac{K - K_m}{K_c - K_m} = \frac{V_c}{\left[1 + (1 - V_c) \frac{3(K_c - K_m)}{3K_m + 4G_m} \right]} \quad (2)$$

$$\frac{G - G_m}{G_c - G_m} = \frac{V_c}{\left[1 + (1 - V_c) \frac{(G_c - G_m)}{G_m + f_1} \right]} \quad (3)$$

$$f_1 = \frac{G_m(9K_m + 8G_m)}{6(K_m + 2G_m)} \quad (4)$$

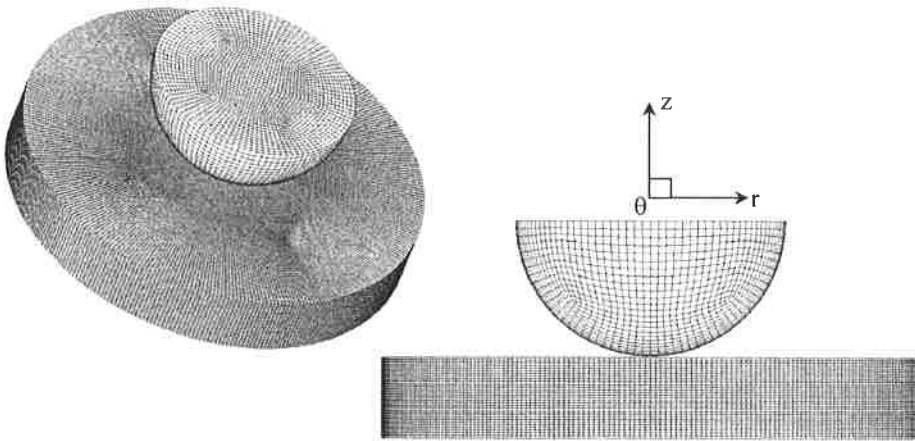
Etkili Young modülü E ve Poisson oranı ν 'yu hesaplamak için;

$$E = \frac{9KG}{3K + G} \quad (5)$$

ve

$$\nu = \frac{3K - 2G}{2(3K + G)} \quad (6)$$

Fonksiyonel kademelendirilmiş dairesel plakanın düşük hızlı çarpma analizi explicit dinamik analiz yapabilen LS-DYNA FEA yazılımı ile yapılmıştır. Plaka ve vurucu 8 düğüm noktalı, her bir düğümde 9 serbestlik dereceli SOLID eleman ile modellendi. Plaka kalınlığı boyunca 10 katman kullanıldı (Şekil 3).



Şekil 3. Fonksiyonel kademelendirilmiş dairesel plakanın ve yarı küresel vurucunun sonlu eleman modeli.

Konvansiyonel kompozitlerin mikromekanik modelleri kullanılarak elastik özelliklerin yaklaşık olarak belirlendiği fonksiyonel kademelendirilmiş malzemelerin lineer-elastik davranışları klasik Hooke kanunu ile tariflenirken, elasto-plastik davranışlarını modellemek için Tamura ve arkadaşları [20] tarafından ortaya atılan ve metal-seramik esaslı fonksiyonel kademelendirilmiş malzemelerin hacimsel oranlarını temel alan TTO model kullanılabilir.

TTO model iki fazlı kompozitlerde iki bileşenin ortalama tek eksenli gerilme ve şekil değiştirme değerleri kullanılarak elde edilen tek eksenli gerilme σ , ve şekil değiştirme ε değerleriyle ilişkilidir:

$$\sigma = V_1 \sigma_1 + V_2 \sigma_2 \quad , \quad \varepsilon = V_1 \varepsilon_1 + V_2 \varepsilon_2 \quad (7)$$

Burada σ_i ve ε_i ($i=1,2$) sırasıyla bileşen fazların ortalama gerilme ve şekil değiştirme değerleri ve V_i ($i=1,2$) ise hacimsel oranları ifade etmektedir. TTO model ilave bir parametre olan q 'yu şu şekilde tanımlar:

$$q = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{\varepsilon_1 - \varepsilon_2} \quad , \quad 0 < q < \infty \quad (8)$$

q parametresi gerilme-şekil değiştirme transfer oranı olarak isimlendirilir, ve değeri bileşenlerin malzeme özelliklerine ve kompozit yapı içerisindeki mikroyapısal etkileşimlerine bağlıdır. Örneğin, $q=\infty$ iken bileşen elemanların yükleme doğrultusundaki deformasyonları özdeştir, halbuki $q=0$ iken bileşen elemanlar aynı gerilme seviyelerine sahiptirler. Genellikle, kompozit yapı içerisindeki bileşen elemanlar karmaşık mikroyapıları (tane şekillerindeki fark, doğrultu, hacimsel oran vb.) nedeniyle farklı gerilme ve şekil değiştirme değerlerine sahiptirler. q 'nın sıfırdan farklı sonlu bir değeri yaklaşık olarak bileşenlerin etkilerini yansıtabilir.

$$\sigma_i = E_i \varepsilon_i \quad (i=1,2) \quad (9)$$

burada E_i ($i=1,2$) bileşen fazların Elastiklik Modülüdür. Kompozitin Elastiklik Modülü E ise şu şekilde hesaplanabilir:

$$E = \left[V_2 E_2 \frac{q + E_1}{q + E_2} + (1 - V_2) E_1 \right] \Bigg/ \left[V_2 \frac{q + E_1}{q + E_2} + (1 - V_2) \right] \quad (10)$$

Kompozitin Poisson Oranı ν :

$$\nu = V_1 \nu_1 + V_2 \nu_2 \quad (11)$$

burada ν_i ($i=1,2$) bileşen fazların Poisson Oranlarıdır.

Seramik/metal kompozitlerin plastik deformasyonu uygulamalarında TTO model, metal bileşen akmaya başlayınca kompozitin aktığını varsayar. Kompozitin akma gerilmesi σ_Y şu şekilde tariflenir:

$$\sigma_Y = \sigma_0 \left[V_2 + \frac{q + E_2}{q + E_1} \frac{E_1}{E_2} (1 - V_2) \right] \quad (12)$$

Burada σ_0 , metalin akma gerilmesidir. Yukarıdaki denklem göstermektedirki kompozitin akma gerilmesi; metalin akma gerilmesi, metalin hacimsel oranı, bileşen fazların Elastiklik Modülleri ve q parametresine bağlıdır. Şimdi burada kompozitin gerilme-şekil değiştirme eğrisini yaklaşık olarak tarif edecek bir güç-kanunu modelini kullanacağız. Sırasıyla metal ve kompozitin akma noktasından sonraki gerilme-şekil değiştirme eğrileri için:

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_0 \left(\frac{\sigma_2}{\sigma_0} \right)^{n_0}, \quad \sigma_2 \geq \sigma_0 \quad (13)$$

ve

$$\varepsilon = \varepsilon_Y \left(\frac{\sigma}{\sigma_Y} \right)^n, \quad \sigma \geq \sigma_Y \quad (14)$$

burada

$$\varepsilon_0 = \frac{\sigma_0}{E_2} \quad \text{ve} \quad \varepsilon_Y = \frac{\sigma_Y}{E}$$

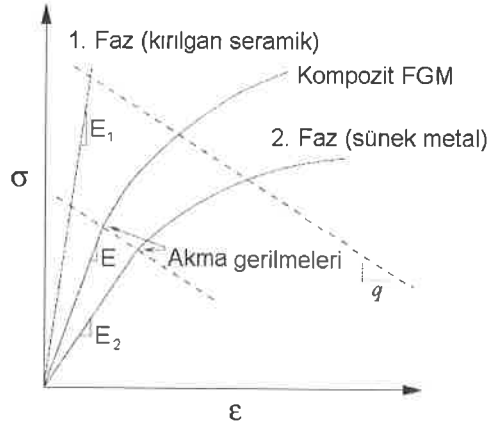
sırasıyla metalin ve kompozitin akma şekil değiştirme değerleri, n_0 ve n ise metal ve kompozitin sertleşme katsayılarıdır. Kompozit için gerilme-şekil değiştirme (σ - ε) eğrisini veren parametrik denklem şu şekilde tarif edilebilir:

$$\begin{aligned} \frac{\varepsilon}{\varepsilon_Y} &= \frac{V_1 E}{q + E_1} \frac{\sigma_2}{\sigma_Y} + \frac{(q + V_2 E_1) E}{(q + E_1) E_2} \frac{\sigma_0}{\sigma_Y} \left(\frac{\sigma_2}{\sigma_0} \right)^{n_0} \\ \frac{\sigma}{\sigma_Y} &= \frac{V_2 q + E_1}{q + E_1} \frac{\sigma_2}{\sigma_Y} + \frac{V_1 q E_1}{(q + E_1) E_2} \frac{\sigma_0}{\sigma_Y} \left(\frac{\sigma_2}{\sigma_0} \right)^{n_0} \end{aligned} \quad (15)$$

Şekil 4 TTO Model ile tariflenen kompozitin gerilme-şekil değiştirme eğrisini şematik olarak göstermektedir. Metalin hacimsel oranı $V_2=1$ olduğunda, Denklem (15) aşağıdaki hale indirgenir:

$$\frac{\varepsilon}{\varepsilon_Y} = \left(\frac{\sigma_2}{\sigma_0} \right)^{n_0}, \quad \frac{\sigma}{\sigma_Y} = \frac{\sigma_2}{\sigma_Y} \quad (16)$$

$V_2=1$ olduğunda $\sigma_Y=\sigma_0$ ve $\varepsilon_Y=\varepsilon_0$ olacağından, bu son ifadeler metal için güç-denklemleri olarak tanımlanır. Dikkat edilirse kompozitin σ - ε eğrisi yukarıdaki eşitliklerden elde edilir. 14 ve 15 eşitlikleri birbirine yaklaştığında n_0 katsayısı en küçük kareler metodu ile belirlenir. Al ve SiC için malzeme özellikleri Tablo 1'de verilmiş olup $q=91.6$ GPa olarak alınmıştır [21].



Şekil 4. TTO Modelin şematik gerilme-şekil değiştirme eğrisi [21].

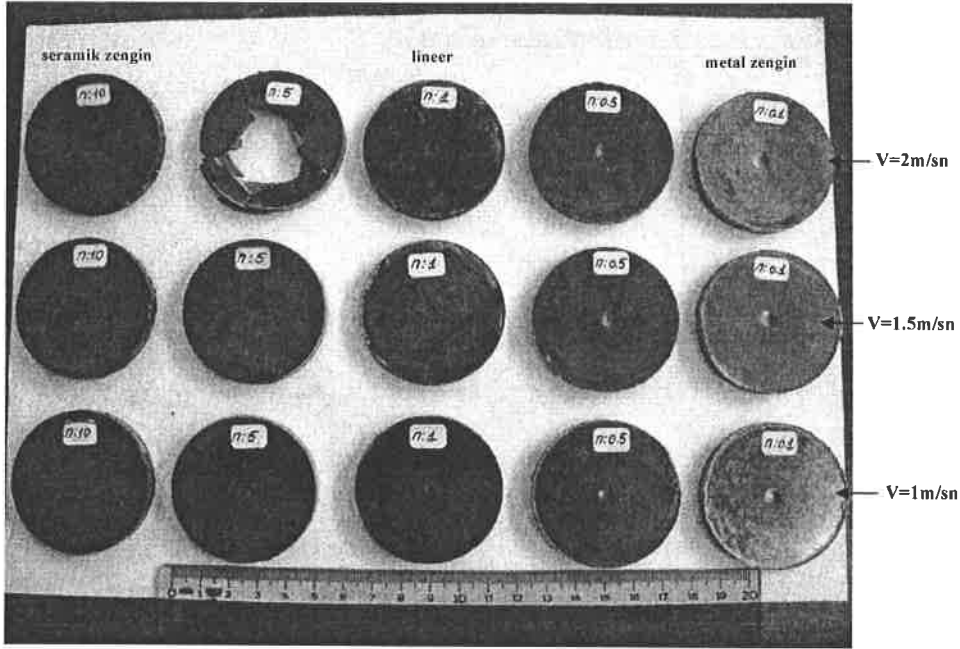
Tablo 1. Al ve SiC'ün malzeme özellikleri [21].

Malzeme	Young Modülü (GPa)	Poisson Oranı	Akma Gerilmesi (MPa)	Sertleşme Katsayısı, n_0
Al	67	0.33	24	2
SiC	302	0.17		

3. Deneysel Çalışma

Fonksiyonel kademelendirilmiş plaka üretiminde metal faz olarak 10 mikron Alüminyum (Al), seramik faz olarak ise 50 mikron Silisyum Karbür (SiC) tozları kullanılmıştır. Herbir katmanda belirli hacimsel oranlarda birleştirilen tozların homojen olarak karışabilmeleri için bir karıştırma ünitesi imal edildi. Fonksiyonel kademelendirilmiş plakalar üretilmeden önce metal-seramik tozları burada yaklaşık 5 saat süreyle karıştırıldı. Numuneler 50mm çapındaki kalıp içerisinde düşük basınç altında soğuk presleme ile belirli hacimsel oranlardaki toz karışımlarından katman katman hazırlandı. Ardından kalıp içerisinde katmanlanmış malzeme fırın içerisine yerleştirilerek 650°C sıcaklığa çıkarıldı, bu sıcaklıkta 1 saat düşük basınç altında (100MPa) preslendi. Kalıp içinde kontrollü olarak basınç altında soğutulan numune, kalıplar birbirinden ayrılarak çıkarıldı. Ayrıca, numunelerin kalıplara yapışmaması için kalıp yan duvarı ile numune arasına ince bir alüminyum film tabaka yerleştirildi.

Üretilen numuneler için çarpma deneyleri 3 farklı hızda ($v=1\text{m/s}$, 1.5m/s , ve 2m/s) ve 5 farklı malzeme kompozisyonu ($n=0.1$, 0.5 , 1.0 , 5.0 ve 10.0) için yapıldı. Bu nedenle 50mm çapında ve 6mm kalınlığında toplam 15 adet numune üretildi. Üretimi yapılan numunelere CEAST marka çarpma cihazında 5.045 kg kütleye sahip vurucu ile $v=1\text{m/s}$, 1.5m/s ve 2m/s hızlarda çarpma deneyleri yapıldı (Şekil 5). Deneysel veriler grafik ortama aktarıldı. Şekil 6'da metal zengin malzeme kompozisyonuna ($n=0.1$) sahip Al-SiC fonksiyonel kademelendirilmiş dairesel plakada vurucu hızının temas kuvvetine etkisi görülmektedir. Vurucu hızı arttıkça temas kuvvetinin arttığı ve buna bağlı olarak fonksiyonel kademelendirilmiş plakada oluşan vurucu izinde büyüdüğü görülmektedir.



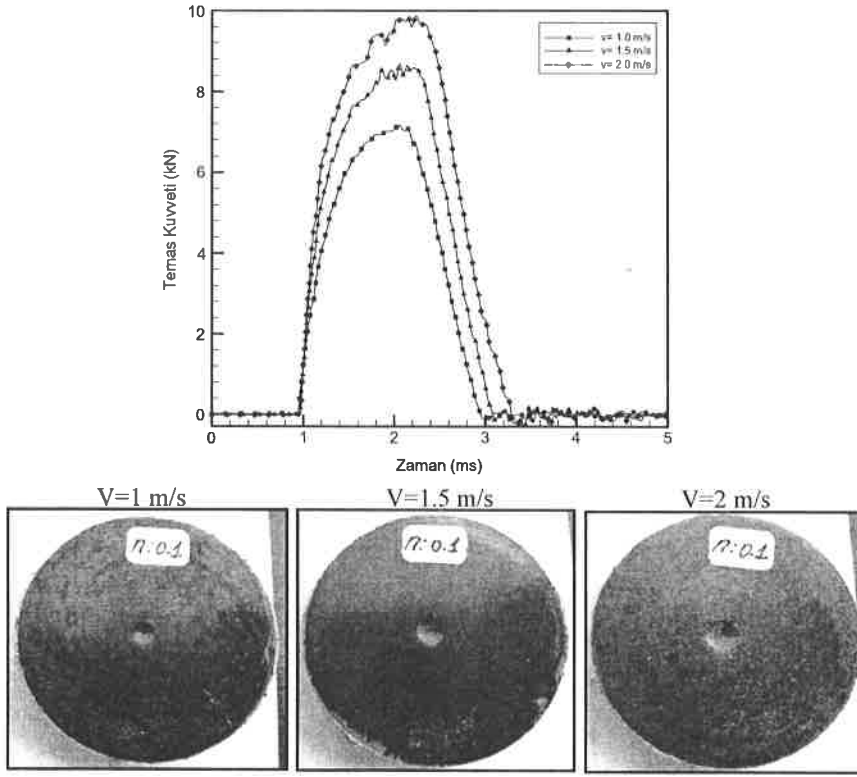
Şekil 5. Çarpma deneylerinden sonra Al-SiC fonksiyonel kademelendirilmiş dairesel plakalar.

Şekil 7’de farklı vurucu hızlarında ($v=0.5\text{m/s}$, 1m/s , ve 2m/s) fonksiyonel kademelendirilmiş plaka kalınlığı boyunca kompozisyonel gradyanın ($n=0.1$, 0.5 , 1.0 , 5.0 ve 10.0) temas kuvvetine etkisi görülmektedir. Tüm hızlarda malzeme kompozisyonu metal yoğun ($n=0.1$) bir yapıdan lineer ($n=1.0$) bir yapıya doğru gittikçe temas kuvvetinin arttığı, buna karşın lineer ($n=1.0$) bir yapıdan seramik yoğun ($n=10.0$) bir yapıya doğru değişen malzeme kompozisyonlarında ise meydana gelen hasar nedeniyle temas kuvvetlerinin azaldığı görülmektedir. Kompozisyonel gradyant değeri arttıkça ($n>1.0$) daha kırılğan bir yapıya kavuşan plakaların çarpma yükleri altında hasara uğradıkları görülmüştür. Hasarın oluşmadığı plakalarda, artan kompozisyonel gradyant değeri ile daha rijit yapıya kavuşan plakalar ve vurucu arasındaki temas süresinin ise azaldığı da görülmektedir.

Şekil 8’de 10 mm kalınlığında lineer ($n=1.0$) malzeme kompozisyonuna sahip Al-SiC fonksiyonel kademelendirilmiş dairesel plakanın $v=4\text{m/sn}$ çarpma hızı için gerçekleştirilmiş olan düşük hızlı darbe davranışının sayısal ve deneysel mukayesesi verilmiştir. Sonuçlar göstermektedir ki yapılan elasto-plastik analizlerle deneysel sonuç toplam temas süresi bakımından neredeyse yakalanmış temas kuvveti değerinde ise deneysel sonuçlara %76 oranında yaklaşım başarılmıştır. Söz konusu bu farkın temel nedeni sayısal analizler için metal fazın (Al) yüksek hızlardaki gerilme şekil değiştirme eğrisi yerine çekme deneyinden elde edilmiş düşük hızlı gerilme şekil değiştirme eğrisinin kullanılmış olmasıdır.

4. Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışmada, düşük hızlı çarpma yükleri altında fonksiyonel kademelendirilmiş dairesel plakaların elasto-plastik davranışları sayısal ve deneysel olarak incelenmiştir. Beş farklı

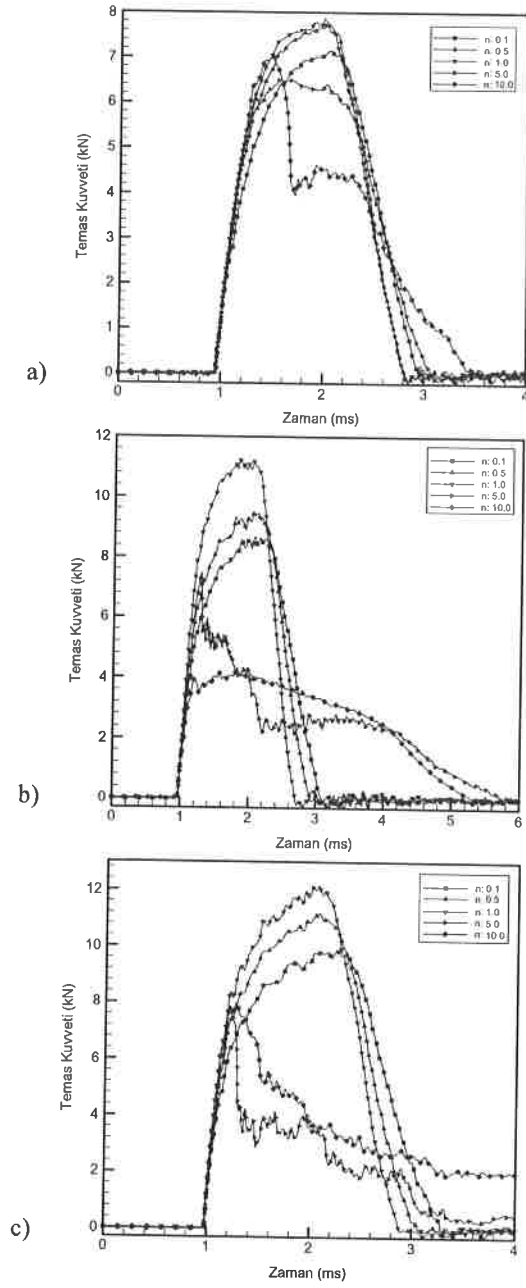


Şekil 6. Vurucu hızının temas kuvvetine etkisi (kompozisyonel gradyant $n=0.1$).

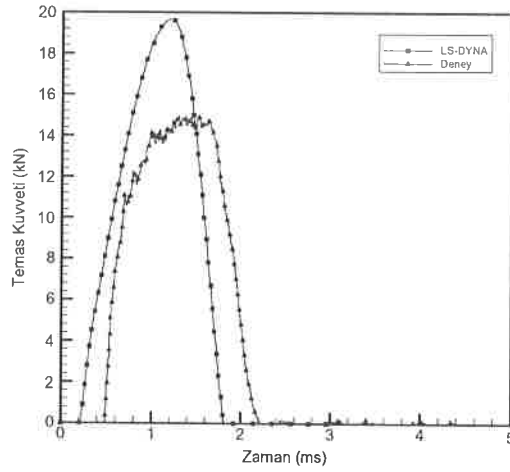
malzeme kompozisyonunda ($n= 0.1, 0.5, 1.0, 5.0, 10.0$) üretilen fonksiyonel kademelendirilmiş dairesel plakalara üç farklı vurucu hızında ($v=1\text{m/s}$, 1.5m/s ve 2 m/s) gerçekleştirilen deneysel çarpma testleri sonucunda malzeme kompozisyonunun $n<1$ olduğu durumlarda artan malzeme kompozisyonu ile temas kuvvetinin arttığı ve temas süresinin ise azaldığı görülmüştür. Malzeme kompozisyonunun $n>1$ numunelerde ise tüm hızlar için hasar oluştuğu görülmüştür ve bunun için bir hasar modeli gereklidir. TTO model kullanılarak yapılan elasto-plastik sayısal analiz ile aynı şartlardaki deneysel sonuca %76 oranında yaklaşılmıştır, bu oranın dahada geliştirilmesi için gerek sayısal modelin gerekse deneysel şartların iyileştirilmesi gerekmektedir.

Teşekkür

Bu çalışma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından sağlanan 107M142 nolu araştırma projesi desteği ile yapılmıştır. Desteğinden dolayı TÜBİTAK'a teşekkür ederiz.



Şekil 7. Fonksiyonel kademelendirilmiş dairesel plakaların kalınlıkları boyunca malzeme kompozisyonunun ve vurucu hızının temas kuvveti değişimine etkisi a) $v=1\text{m/s}$, b) $v=1.5\text{m/s}$, ve c) $v=2\text{m/s}$. (vurucu kütlesi= 5.045kg)



Şekil 8. Al-SiC fonksiyonel kademelendirilmiş dairesel plaka için LS-DYNA ve deneysel sonuçların karşılaştırılması ($R=0.02$ m, $h=0.01$, katman=11, vurucu hızı=4 m/sn, $n=1.0$)

Kaynaklar

- [1] Ceyhun, V. ve Turan, M., "Tabakalı Kompozit Malzemelerin Darbe Davranışı", Mühendis ve Makina, 516, 1-11, 2003.
- [2] Lakshminarayana, H.V., Boukhili, R. ve Gauvin, R., "Impact Response of Laminated Composite Plates: Prediction and Verification", Composite Structures, 28, 61-72, 1994.
- [3] Collombet, F., Lalbin, X. ve Lataillade, J.L., "Impact Behavior of Laminated Composites: Physical Basis for Finite Element Analysis", Composites Science and Technology, 58, 463-478, 1998.
- [4] Oguibe, C.N. ve Webb, D.C., "Finite-Element Modelling of the Impact Response of Laminated Composite Plate", Composites Science and Technology, 59, 1913-1922, 1999.
- [5] Mili, F. ve Necib, B., "Impact Behavior of Cross-Ply Laminated Composite Plates Under Low Velocities", Composite Structures, 51, 237-244, 2001.
- [6] Guinard, S., Allix, O., Guédré-Degeorges, D. ve Vinet, A., "A 3D Damage Analysis of Low-Velocity Impacts on Laminated Composites", Composites Science and Technology, 62, 585-589, 2002.
- [7] Krishnamurthy, K.S., Mahajan, P. ve Mittal, R.K., "Impact Response and Damage in Laminated Composite Cylindrical Shells", Composite Structures, 59, 15-36, 2003.
- [8] Aslan, Z., Karakuzu, R. ve Okutan, B., "The Response of Laminated Composite Plates Under Low-Velocity Impact Loading", Composite Structures, 59, 119-127, 2003.
- [9] Jiang, D. ve Shu, D., "Stress Distribution in Damaged Composite Laminates Under Transverse Impact", Composite Structures, 63, 407-415, 2004.

- [10] Jiang, D. ve Shu, D., "Local Displacement of Core in Two-Layer Sandwich Composite Structures Subjected to Low Velocity Impact", *Composite Structures*, 71, 53-60, 2005.
- [11] Zhang, Y., Zhu, P. ve Lai, X., "Finite Element Analysis of Low-Velocity Impact Damage in Composite Laminated Plates", *Materials and Design*, 27, 513-519, 2006.
- [12] Ibekwe, S.I., Mensah, P.F., Li, G., Pang, S. ve Stubblefield, M.A., "Impact and Post Impact Response of Laminated Beams at Low Temperatures", *Composite Structures*, 79, 12-17, 2007.
- [13] Minak, G. ve Ghelli, D., "Influence of Diameter and Boundary Conditions on Low Velocity Impact Response of CFRP Circular Laminated Plates", *Composites: Part B: Engineering*, basımda, 2008.
- [14] Tita, V., Carvalho, J. ve Vandepitte, D., "Failure Analysis of Low Velocity Impact on Thin Composite Laminates: Experimental and Numerical Approaches", *Composite Structures*, 83, 413-428, 2008.
- [15] Gong, S.W., Lam, K.Y. ve Reddy, J.N., "The Elastic Response of Functionally Graded Cylindrical Shells to Low-Velocity Impact", *International Journal of Impact Engineering*, 22, 397-417, 1999.
- [16] Apetre, N.A., Sankar, B.V. ve Ambur, D.R., "Low-Velocity Impact Response of Sandwich Beams With Functionally Graded Core", *International Journal of Solids and Structures*, 43, 2479-2496, 2006.
- [17] Kubair, D.V. ve Lakshmana, B.K., "Cohesive Modeling of Low-Velocity Impact Damage in Layered Functionally Graded Beams", *Mechanics Research Communications*, 35, 104-114, 2008.
- [18] Mori, T. ve Tanaka, K., "Average Stress in Matrix and Average Elastic Energy of Materials with Misfitting Inclusions", *Acta Metallurgica*, 21, 571-574, 1973.
- [19] Benveniste, Y., "A New Approach to the Application of Mori-Tanaka's Theory in Composite Materials", *Mech. Mater.*, 6, 147-157, 1987.
- [20] Tamura, I., Tomato, Y. ve Ozawa H., "Strength and Ductility of Fe-Ni-C Alloys Composed of Austenite and Martensite with Various Strength", In: *Proceedings of the Third Conference on Strength of Metals and Alloys*, vol. 1, Cambridge: Institute of Metals; 611-615, 1973.
- [21] Bhattacharyya, M., Kapuria, S. ve Kumar, A.N., "On the Stress to Strain Transfer Ratio and Elastic Deflection Behavior for Al/SiC Functionally Graded Material", *Mech. Adv. Mater. Struct.*, 14, 295-302, 2007.