

T.C.
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ
BİLİMSEL ARAŞTIRMA PROJELERİ
KOORDİNASYON BİRİMİ

**FONKSİYONEL KADEMELENDİRİLMİŞ KOMPOZİT PLAKALARIN
YÜKSEK HIZLI ÇARPMA YÜKLERİ ALTINDA TERMO-MEKANİK
DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**
Proje No: FBA-08-534

NORMAL ARAŞTIRMA PROJESİ (NAP)

SONUÇ RAPORU

Proje Yürütücüsü:
Yrd. Doç. Dr. Fehmi NAİR
Mühendislik Fakültesi/Makina Müh. Bölümü

Araştırmacıların Adı Soyadı
Prof. Dr. M. Baki KARAMIŞ
Prof. Dr. M. Kemal APALAK
Yrd. Doç. Dr. Reecep GÜNEŞ
Mühendislik Fakültesi/Makina Müh. Bölümü

EKİM 2010

KAYSERİ

TEŐEKKÖR

Bu proje Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından FBA-08-534 protokol numarası ile desteklenmiştir. Desteęinden dolayı teőekkör ederiz.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa No
ÖZET	1
ABSTRACT	3
1. GİRİŞ / AMAÇ VE KAPSAM	4
2. GENEL BİLGİLER	5
3. GEREÇ VE YÖNTEM	7
4. BULGULAR	14
5. TARTIŞMA VE SONUÇ	30
6. KAYNAKLAR	32

ÖZET

Fonksiyonel kademelendirilmiş malzemeler, seramik-metal bağlantıların ara yüzeylerinde termo-mekanik uyumsuzlukların azaltıldığı en uygun yapılardır ve böylece yüksek sıcaklık ortamlarında çalışan yapılarda oluşan artık gerilmeleri de azaltabilirler. Fonksiyonel kademelendirilmiş malzemelerin uygulama alanları uzay, nükleer ve otomobil endüstrileri gibi oldukça özellikli yerlerdir. Bu nedenle fonksiyonel kademelendirilmiş malzemelerin mekanik özelliklerinin ve malzeme karakterizasyonunun belirlenmesi oldukça önem taşımaktadır. Fonksiyonel kademelendirilmiş malzemeler zor çalışma şartlarına sahip darbeli ortamlarda veya balistik amaçlı olarak da kullanılabilirler. Bu nedenle bu malzemelerin darbe dayanımlarının da belirlenmesi oldukça önemlidir.

Bu proje çalışmasında, fonksiyonel kademelendirilmiş dairesel plakaların darbe davranışları sayısal ve deneysel olarak incelendi. Yapılan sayısal analizler bir sonlu elamanlar paket programı olan LS-DYNA ile gerçekleştirildi. Analizler farklı malzeme kompozisyonu ve vurucu hızları için tekrarlandı. Fonksiyonel kademelendirilmiş dairesel plaka kenarlarından ankastre bağlanmış ve seramik zengin yüzeyden merkezi çarpmaya maruz bırakılmıştır. Kompozisyonu kalınlık boyunca değişen dairesel plaka, seramik (SiC) ve metal (Al) fazlardan oluşmuştur. Seramik ve metal katmanlar arasında kalan fonksiyonel kademelendirilmiş bölgenin mekanik özelliklerinin plaka kalınlığı boyunca sürekli olarak bileşenlerin hacimsel oranlarındaki değişime bağlı olarak bir üstel kanuna göre değiştiği varsayılmıştır. Kademelendirilmiş bölgedeki lokal malzeme özelliklerinin hesaplanmasında mikromekanik model olarak Mori-Tanaka şeması kullanıldı. Elasto-plastik analizler için iki farklı bileşene sahip yapılarda bileşenlerin tek eksenli gerilme-şekil değiştirme değerlerini kullanarak kompozit malzemenin gerilme şekil değiştirme eğrisini veren TTO (Tamura-Tomota-Ozowa) model kullanıldı.

Deneysel çalışmada kullanılan fonksiyonel kademelendirilmiş dairesel plakalar Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Kompozit Malzemeler Laboratuvarında katmanlama yöntemi (powder stacking-hot pressing) ile beş farklı malzeme kompozisyonu için ($n=0.1$, $n=0.5$, $n=1$, $n=5$ ve $n=10$) üretildi. Numunelerin üretimi için seramik faz olarak 50 mikron boyutlarında Silisyum Karbür, metal faz olarakta 10 mikron boyutlarında Alüminyum tozlar kullanıldı. Üretilen numunelerin çarpma testleri ise Mekanik Laboratuvarında bulunan CEAST marka darbe test cihazında farklı malzeme kompozisyonları için üç farklı hızda ($v=1$, 1.5 ve 2

m/s) gerçekleştirildi. Elde edilen deneysel ve sayısal veriler mukayese edilerek sayısal model iyileştirilmeye çalışıldı.

Anahtar Kelimeler: Fonksiyonel kademelendirilmiş malzemeler (FGM); Darbe; Elasto-plastik analiz; Sonlu elemanlar metodu.

ABSTRACT

Functionally graded materials are most suitable structures which reduce thermo-mechanical mismatches along the metal-ceramic interfaces. They can also reduce residual stresses in such structures in high temperature environments. FGMs have special applications such as aerospace, nuclear and automobile industries. Therefore, it is important to determine the mechanical properties and material characterization of the functionally graded materials. FGMs are also used for ballistic purposes or percussive applications where the operating conditions are severe. Therefore, it is necessary to know the behaviours of FGMs under impact loadings.

In this project study, the impact behaviors of functionally graded circular plates were investigated numerically and experimentally. A finite element program LS-DYNA was used for the numerical analysis. The effects of material composition and impactor velocity on the impact behaviour of FGM plates were investigated. Functionally graded circular plate was subjected to a central impact load on its ceramic surface for the clamped boundary condition. The mechanical properties of the material are assumed to vary continuously through the plate thickness between the metal (Al) and ceramic (SiC) layers according to a power-law distribution of the volume fraction of the constituents. The locally effective material properties were evaluated using homogenization method 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.

For the experimental studies, functionally graded circular plates with five different material compositions ($n=0.1, 0.5, 1, 5$ and 10) were manufactured with powder stacking-hot pressing method at the Composite Materials Laboratory in Erciyes University. SiC powder of 50 micron as ceramic phase and Al powder of 10 micron as metal phase were used in order to produce of FGM specimens. Impact tests were carried out in the Mechanic Laboratory in Erciyes University by using CEAST drop-weight impact device. Experiments were carried out for three different impact velocities ($v=1, 1.5$ and 2 m/s). Experimental results were compared to numerical results in order to improve the numerical model.

Keywords: Functionally graded materials (FGMs); Impact; Elasto-plastic analysis, Finite element method.

1. GİRİŞ / AMAÇ VE KAPSAM

Fonksiyonel kademelendirilmiş malzemeler (Functionally Graded Materials=FGMs) belirli bir pozisyonda malzeme kompozisyonunun sürekli olarak değiştiği yapılar olarak tanımlanırlar. Genellikle seramik-metal bileşiminden oluşan bu malzemeler kötü çalışma şartlarına sahip uygulamalar için son derece uygundur. Örneğin, ağır aşındırıcı parçaların taşınmasında aşınmaya karşı astar olarak, roket ısı koruyucularında, ısı değiştirici tüplerde, termoelektrik jeneratörlerde, ısı motoru parçalarında, füzyon reaktörlerinin koruyucu yüzeylerinde, ve elektrik yalıtımında. Fonksiyonel kademelendirilmiş malzemeler, seramik-metal bağlantıların arayüzeylerinde termo-mekanik uyumsuzlukların azaltıldığı ideal yapılardır ve böylece yüksek sıcaklık ortamlarında çalışan yapılarda oluşan artık gerilmeleri de azaltabilirler. Fonksiyonel kademelendirilmiş malzemelerdeki ısı gerilmeleri kompozisyonel ve mikro-yapısal dağılımın kontrol edilmesiyle azaltılabilir. Yine de fonksiyonel kademelendirilmiş malzemelerin çoğu kompozisyonundaki sürekli makroskopik değişimler nedeniyle artık gerilmelere sahiptirler ve bu artık gerilmeler fonksiyonel kademelendirilmiş malzemenin mekanik özelliklerini de etkiler.

Fonksiyonel kademelendirilmiş malzemeler zor çalışma şartlarına sahip darbeli ortamlarda veya balistik amaçlı olarak da kullanılabilirler. Bu nedenle bu malzemelerin darbe dayanımlarının da belirlenmesi oldukça önemlidir. 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, içyapıda 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 aktarılacak enerjinin miktarı, malzemenin bu enerjiyi sönümleyebilmesi için oluşacak hasar modlarını belirleyecektir. Bu nedenle kompozit malzemede darbenin oluşturacağı hasarı tahmin etmek için darbe hızının belirlenmesi oldukça büyük bir öneme sahiptir.

Yapılan bu çalışmada, son derece kritik uygulamalara sahip olan fonksiyonel kademelendirilmiş kompozit plakaların çarpma yükleri altında deformasyon davranışlarının teorik ve deneysel olarak belirlenmiştir.

2. GENEL BİLGİLER

Kompozit malzemelerden yapılmış mühendislik yapı elemanları havacılık, otomotiv, gemicilik, spor malzemeleri ve inşaat mühendisliği gibi birçok endüstri alanında artarak kullanılmaktadır. Kompozitlerin kullanılmasının zorlayıcı nedeni metaller gibi klasik malzemelere göre sağladığı avantajlardır. Bu avantajlar kısaca şöyle sıralanabilir; yüksek mukavemet-ağırlık oranı, yüksek rijitlik-ağırlık oranı, korozyona karşı direnç, düşük ısıl genleşme katsayısı, geniş sıcaklık aralığında kullanılabilirlik ve gereksinimlere göre istenilen toleranslarda üretilerek kullanılabilmesidir.

Bu çekici özelliklerine rağmen, kompozit malzemeler, özellikle fiber doğrultusu dışındaki yönlerde nispeten düşük çarpma direncine sahiptirler. Bu şekilde oluşabilecek bir hasar yapısal mukavemetin ciddi olarak azalmasına sebep olabilir. Bu durum düşük çarpma hızlarında, gözle görülemeyen ciddi iç hasarların oluşması nedeniyle daha da tehlikelidir.

Bu anlamda kompozit malzemelerin çarpma yüklerine karşı cevapları metallerinkinden oldukça farklıdır. Örneğin, metal yapıların çarpma hasarları genellikle yüzeyden başlar ve göz ile belirlenebilir. Fakat kompozitlerde karakteristik hasar mukavemetinde ciddi azalmalara sebep olan delaminasyon, matriks çatlağı veya fiber kırılması şeklinde olup gözle görülemeyecek şekilde yapının içinde oluşabilir. Ayrıca, çarpma esnasında ortaya çıkan düşük ve orta enerjiler metaller tarafından elastik ve plastik deformasyonlar tarzında absorbe edilebilir. Kompozitlerde ise absorbe edilen enerjinin neden olduğu plastik deformasyon kabiliyeti oldukça sınırlıdır ve bu enerji malzemenin mukavemeti ve rijitliğinde azalmaya sebep olan hasar bölgelerinin oluşmasına neden olur. Bununla beraber, kompozit yapılarda

Çarpma sonrası hasar bölgesinin davranışını tahmin etmek metallerinkinden daha zordur. Bu problemlere rağmen, kompozit yapıların çarpma davranışlarının belirlenmesi amacıyla birçok çalışma yapılmıştır. Lakshminarayana ve arkadaşları [1] katmanlı kompozit plakaların çarpma davranışlarını sonlu elemanlar metodunu kullanarak incelediler. Collombet ve arkadaşları [2] kompozit yapılarda çarpma nedeniyle oluşan hasarı nümerik ve deneysel olarak incelediler. Meydana gelen hasarın modellenmesinde iki yaklaşım sundular: 1) hasar modelleri ve temas tekniği, 2) hasarın başlamasını ve ilerlemesini belirlemek için basit kriter. Oguibe ve Webb [3] fiber takviyeli kompozit plakaların düşük hızlı çarpma altındaki davranışlarını sonlu elemanlar metodunu kullanarak incelediler. Yaptıkları modellemeye bir başarısızlık algoritması ilave ettiler ve elde ettikleri sonuçları önceden yapılmış deneysel çalışmalar ile doğruladılar. Mili ve Necib [4] E-glass/epoxy katmanlı kompozit plakaların düşük hızlar altındaki çarpma davranışlarını deneysel ve teorik olarak incelediler. Yay-küyle model yaklaşımı kullanarak Hertzian temas kanununu geliştirdiler. İnce dairesel kompozit plakalar ve yarı küresel uçlu silindirik alüminyum vurucu kullandıkları çalışmalarında, artan çarpma hızlarında deneysel ve teorik sonuçlar arasındaki farkın arttığını tespit ettiler bunun nedeni olarak ise çarpma cihazının raylarında oluşan sürtünme kayıplarını gösterdiler. Guinard ve arkadaşları [5] düşük hızlı çarpma neticesinde katmanlı kompozitlerin üç boyutlu hasar analizlerini yaptılar. Düşük hızlı darbe ile oluşturulmuş hasarın başlangıcı ve ilerlemesini hasar mekaniğini kullanarak incelediler. Krishnamurthy ve arkadaşları [6] katmanlı kompozit silindirik kabukların çarpma tepkilerini hem klasik Fourier serilerini hemde sonlu elemanlar metodunu kullanarak belirlediler. Aslan ve arkadaşları [7] E-glass/epoxy katmanlı kompozit plakaların düşük hızlı darbelerini deneysel ve teorik olarak çalıştılar. Kompozit yapıların düşük hızlı çarpma yükleri altındaki mekanik davranışlarının plakaların düzlem içi boyutlarına ve çarpma kütesine bağılı olarak değiştiğini gösterdiler. Jiang ve Shu [8] merkezi normal çarpmaya maruz kompozit katmanların hasarını üç boyutlu sonlu elemanlar analiziyle incelediler. Katmanlardaki gerilme dağılımları üzerinde hasarın etkilerini detaylı olarak incelediler ve hasarlı katmanda oluşan hasarın şekil değiştirme enerjisini serbest bırakarak gerilme yığılmalarını azalttığını tespit ettiler. Bir diğer çalışmalarında [9] iki tabakalı sandviç yapıların düşük hızlı noktasal çarpma yükü altındaki deformasyonlarını çalıştılar. Ara tabakanın yerleşiminin bölgesel yerdeğiştirmeler üzerine etkisini incelediler. Zhang ve arkadaşları [10] katmanlı kompozit plakaların düşük hızlı çarpma testlerinde hasarın başlangıcı ve ilerlemesini tahmin eden bir nümerik model geliştirdiler. Bunun için sonlu elemanlar metodunu kullandılar ve bu modelin deneysel çalışmalar ile uyumlu olduğunu gösterdiler. Ibekwe ve arkadaşları [11] düşük sıcaklıklarda katmanlı kompozitlerin düşük

hızlı çarpma tepkilerini ve çarpma sonrası basma burkulma mukavemetlerini deneysel olarak incelediler. Ortam sıcaklığının çarpma hasarı, artık basma burkulma mukavemeti ve elastiklik modülü üzerindeki etkisini değerlendirdiler. Minak ve Ghelli [12] karbon fiber takviyeli dairesel katmanlı kompozit plakalarda düşük hızlı ve düşük enerjili çarpma testleri yaptılar. Numune boyutları ve sınır şartlarının dinamik davranış ve malzeme hasarı üzerindeki etkilerini araştırdılar ve netice olarak her ikisinde oldukça etkili olduklarını tespit ettiler. Tita ve arkadaşları [13] katmanlı kompozit ince disklerde düşük hızlı çarpmayı deneysel ve nümerik olarak çalıştılar. Katman dizilimi ve çarpma enerjisinin kompozit plakaların dinamik davranışı üzerindeki etkilerini incelediler.

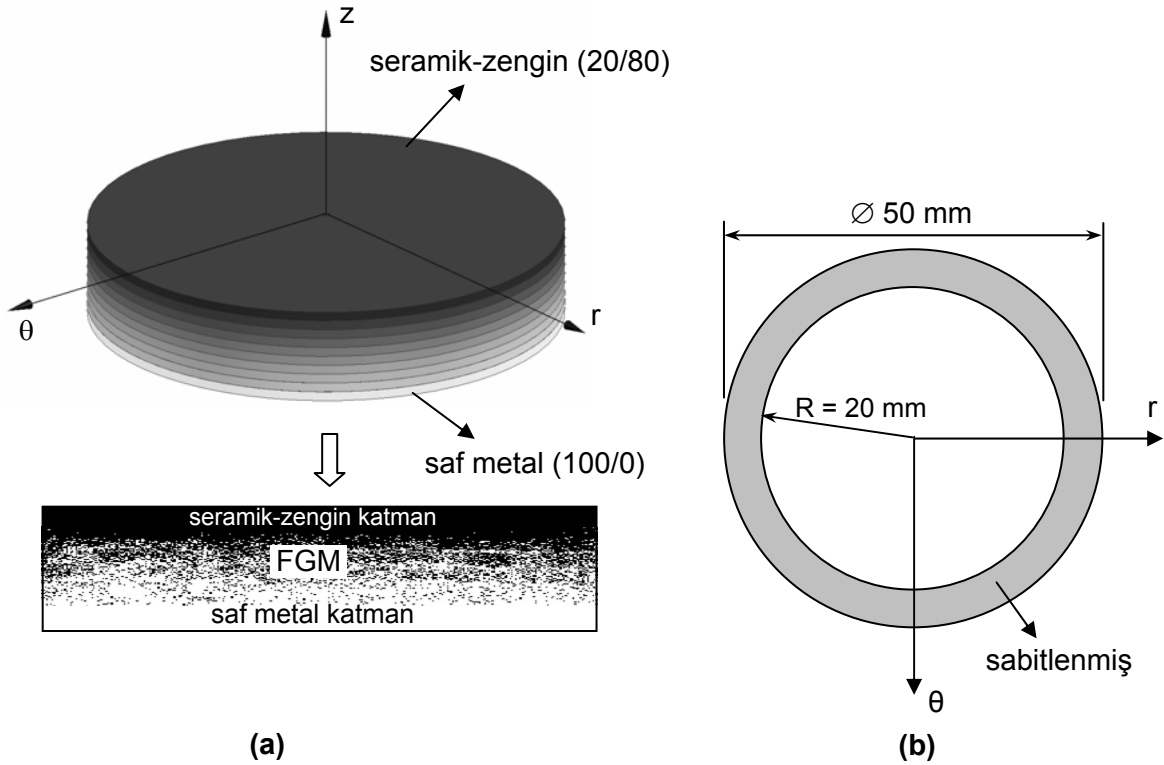
Yapılan literatür çalışmasında yukarıda da detaylı olarak behsedildiği gibi katmanlı kompozit yapıların düşük hızlı çarpma davranışları konusunda pekçok çalışma varken fonksiyonel kademelendirilmiş yapıların darbe davranışları konusunda oldukça sınırlı sayıda çalışmanın olduğu görülmektedir. Gong ve arkadaşları [14] düşük hızlı çarpma nedeniyle fonksiyonel kademelendirilmiş silindirik kabukların dinamik tepkilerinin analitik çözümünü sundular. Apetre ve arkadaşları [15] 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 [16] 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 kiriş merkezinde fonksiyonel kademelendirilmiş yapının kullanılmasıyla hasar enerjisinin değiştirilebileceği sonucuna vardılar.

3. GEREÇ VE YÖNTEM

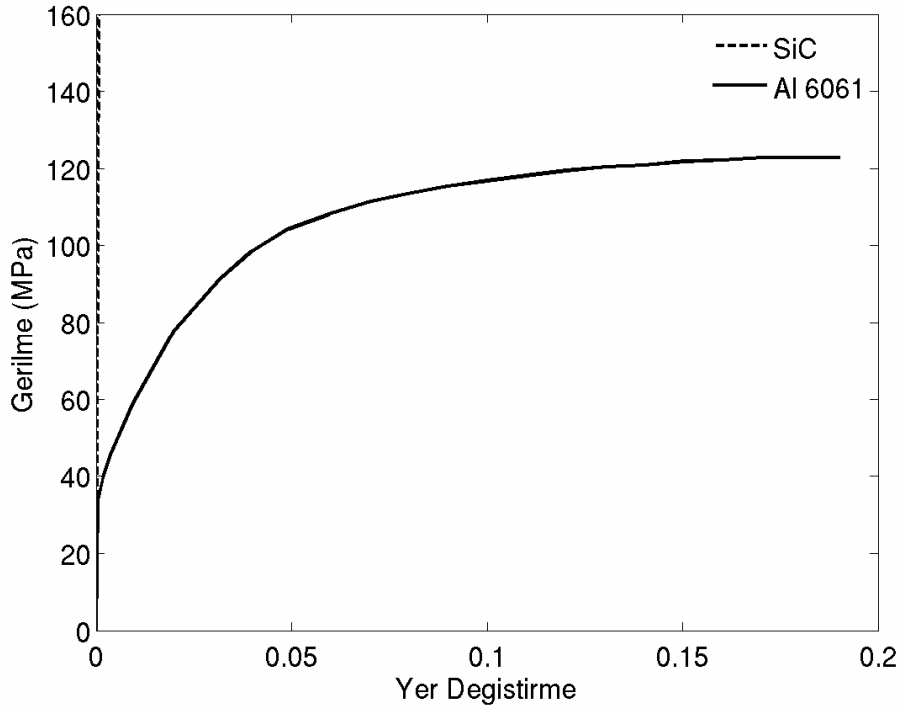
Fonksiyonel kademelendirilmiş plakaların çarpma yükleri altındaki elasto-plastik davranışları sayısal ve deneysel olarak incelenmiştir. Çarpma enerjisi ve malzeme kompozisyonunun fonksiyonel kademelendirilmiş dairesel plakaların çarmaya karşı cevabı üzerindeki etkisini anlayabilmek için ağırlık düşürme darbe cihazı kullanılarak bazı çarpma testleri yapılmıştır. Sayısal analizler LS-DYNA sonlu elemanlar yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Fonksiyonel kademelendirilmiş dairesel plakaların elasto-plastik davranışlarını simüle

edebilmek için TTO model, LS-DYNA kodu içine gömülmüştür. Elde edilen sayısal sonuçlar ile deneysel veriler mukayese edilmiştir.

Al/SiC fonksiyonel kademelendirilmiş dairesel plakaların (Şekil 1) düşük hızlı darbe analizleri LS-DYNA sonlu elemanlar programında yapıldı. TTO model gereğince alüminyum bileşenin elasto-plastik, seramik bileşenin ise lineer elastik olarak davrandığı kabul edildi. Şekil 2 metal (Al6061) ve seramik (SiC) fazların gerçek gerilme-şekil değiştirme eğrilerini göstermektedir. Metal fazın akma gerilmesi gerilme-şekil değiştirme eğrisinden kaydırma kuralı ile (%0.2 kaydırma) bulundu. Buna göre, alüminyumun akma gerilmesi 36 MPa ve akma şekil değiştirmesi ise 0.0006 olarak tespit edilmiştir. Alüminyum ve silisyum karbür için mekanik özellikler Tablo 1’de verilmiştir.



Şekil 1. (a) Fonksiyonel kademelendirilmiş dairesel plaka, (b) uygulanan sınır şartı.



Şekil 2. Al6061 ve SiC'ün gerçek gerilme-şekil değiştirme eğrileri.

Tablo 1. Alüminyum, Silisyum Karbürün mekanik özellikleri [21]

Malzeme	Young Modülü (GPa)	Poisson Oranı	Yoğunluk (kg/m ³)	Akma Gerilmesi (MPa)	Sertleşme Katsayısı, n_0
Alüminyum	67	0.33	2702	36	5.35
Silisyum Karbür	302	0.17	3100		

Plaka kalınlığı boyunca lokal malzeme özellikleri Mori-Tanaka şeması [17,18] kullanılarak hesaplandı. Al/SiC fonksiyonel kademelendirilmiş dairesel plakaların elasto-plastik davranışları ise TTO (Tamura-Tomota-Ozowa) modeli ile tanımlanmıştır.

İki fazlı fonksiyonel kademelendirilmiş bir plakada 1 indisi metal fazı, 2 indisi ise seramik fazı ifade etmektedir. Fonksiyonel kademelendirilmiş malzemenin lokal etkili hacim modülü K ve kayma modülü G Mori-Tanaka tarafından şu şekilde hesaplanır

$$\frac{K - K_2}{K_1 - K_2} = \frac{V_1}{\left[1 + (1 - V_1) \frac{3(K_1 - K_2)}{3K_2 + 4G_2} \right]} \quad (1)$$

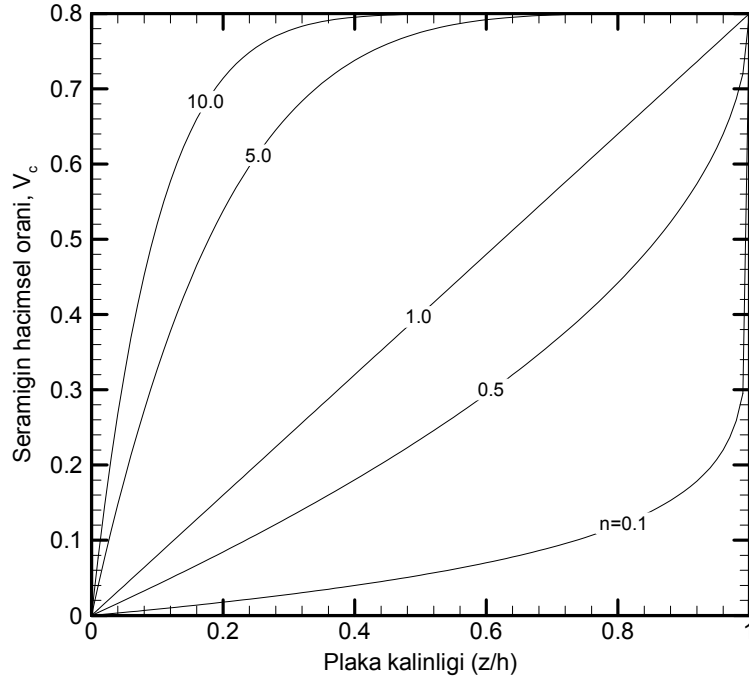
$$\frac{G - G_2}{G_1 - G_2} = \frac{V_1}{\left[1 + (1 - V_1) \frac{(G_1 - G_2)}{G_2 + f_2} \right]} \quad (2)$$

$$f_2 = \frac{G_2(9K_2 + 8G_2)}{6(K_2 + 2G_2)} \quad (3)$$

burada V faz malzemelerin hacimsel oranlarıdır ve $V_1 + V_2 = 1$ ilişkisine sahip olup V_1 aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$V_1(z) = \left(\frac{z}{h} \right)^n \quad (4)$$

burada n hacimsel oranı tarifleyen üstür. Şekil 3 plaka kalınlığı boyunca seramik bileşenin hacimsel oranındaki değişimi seramik-zengin üst yüzey ile saf metal alt yüzey arasında $n = 0.1, 0.5, 1.0, 5.0$ ve 10.0 için göstermektedir.



Şekil 3. Fonksiyonel kademelendirilmiş plakada çeşitli n değerleri için seramik fazın hacimsel oranındaki değişim.

Etkili Young modülü ve Poisson oranı ise aşağıdaki gibi hesaplanır:

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

ve

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

Mori-Tanaka şeması malzeme yoğunluğunu hesaplayamaz. Fonksiyonel kademelendirilmiş malzemenin her bir katmanının yoğunluğu aşağıdaki lineer karışım kuralıyla hesaplanabilir:

$$\rho = V_1\rho_1 + V_2\rho_2 \quad (7)$$

Metal/seramik fonksiyonel kademelendirilmiş malzemelerin elasto-plastik davranışları ilk olarak Tamura ve arkadaşları [19] tarafından kullanılan ve daha sonra Williamson ve arkadaşları [20] tarafından fonksiyonel kademelendirilmiş malzemelere adapte edilen bir ortalama karışım yasası olan TTO model ile tanımlandı. TTO modele göre iki fazlı yapıya sahip fonksiyonel kademelendirilmiş malzemenin her bir katmanı izotropik olarak davranır ve kompozitin tek eksenli gerilme σ ve şekil değiştirme ε davranışı bileşen fazların tek eksenli gerilme şekil değiştirme davranışlarının ortalamasıyla ilişkilidir:

$$\sigma = V_1\sigma_1 + V_2\sigma_2, \quad \varepsilon = V_1\varepsilon_1 + V_2\varepsilon_2 \quad (8)$$

burada σ_i ve ε_i ($i = 1, 2$) bileşen fazların sırasıyla ortalama gerilme ve şekil değiştirme değerleridir, ve V_i ($i = 1, 2$) ise hacimsel oranlardır. TTO modelde q parametresi ise şu şekilde kullanılır:

$$q = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{|\varepsilon_1 - \varepsilon_2|}, \quad 0 < q < \infty \quad (9)$$

burada q iki faz arasındaki gerilme-şekil değiştirme transfer oranıdır. q parametresi sisteme bağlı olarak sıfır ile sonsuz arasında değer alabilir. Örneğin, $q=0$ iken bileşen elemanlar eşit gerilme dağılımına sahipken, $q=+\infty$ olduğunda ise eşit şekil değişimi dağılımına sahip olurlar. q 'nın uygun değerinin seçimi ana malzemenin tipine bağlı olması sebebiyle, nümerik veya deneysel olarak bulunmalıdır. Al/SiC için q 'nın değeri araştırmacılar tarafından [21]

deneysel olarak 91.6 GPa bulunmuştur ve bu değer çalışmamızda Al/SiC fonksiyonel kademelendirilmiş plakanın katmanlarının gerilme-şekil değiştirme (σ - ε) eğrilerinin hesaplanmasında kullanılmıştır. Seramik/metal fonksiyonel kademelendirilmiş kompozitlerin plastik deformasyonları için TTO model, metal bileşen aktığında kompozitinde aktığını varsayar. Buna göre, kompozitin akma gerilmesi σ_Y aşağıdaki gibidir:

$$\sigma_Y(V_2) = \sigma_0 \left[V_2 + \frac{q + E_2}{q + E_1} \frac{E_1}{E_2} (1 - V_2) \right] \quad (10)$$

burada σ_0 metal fazın akma gerilmesidir. Yukarıdaki denklemden de görülebileceği gibi kompozitin akma gerilmesi metalin akma gerilmesi, metalin hacimsel oranı, bileşen fazların Elastiklik modülleri ve q parametresine bağlıdır. Aşağıdaki parametrik denklemler kullanılarak kompozit için gerilme-şekil değiştirme (σ - ε) eğrisi hesaplanır.

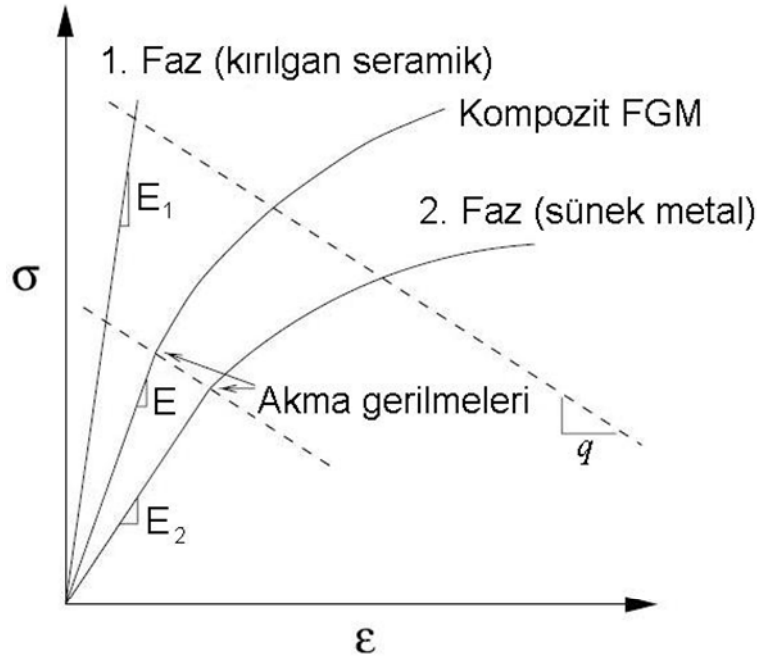
$$\frac{\varepsilon}{\varepsilon_Y} = \frac{V_1 E}{q + E_1} \frac{\sigma_2}{\sigma_Y} + \frac{(q + V_2 E_1) E}{(q + E_1) E_2} \frac{\sigma_0}{\sigma_Y} \left(\frac{\sigma_2}{\sigma_0} \right)^{n_0} \quad (11)$$

$$\frac{\sigma}{\sigma_Y} = \frac{V_2 q + E_1}{q + E_1} \frac{\sigma_2}{\sigma_Y} + \frac{V_1 q E_1}{(q + E_1) E_2} \frac{\sigma_0}{\sigma_Y} \left(\frac{\sigma_2}{\sigma_0} \right)^{n_0}$$

burada $\varepsilon_Y = \frac{\sigma_Y}{E}$ kompozitin akma şekil değiştirme değeri, n_0 ise metalin sertleşme katsayısıdır. Aşağıdaki denkleme en küçük kareler metodu uygulanarak n_0 değeri hesaplanır.

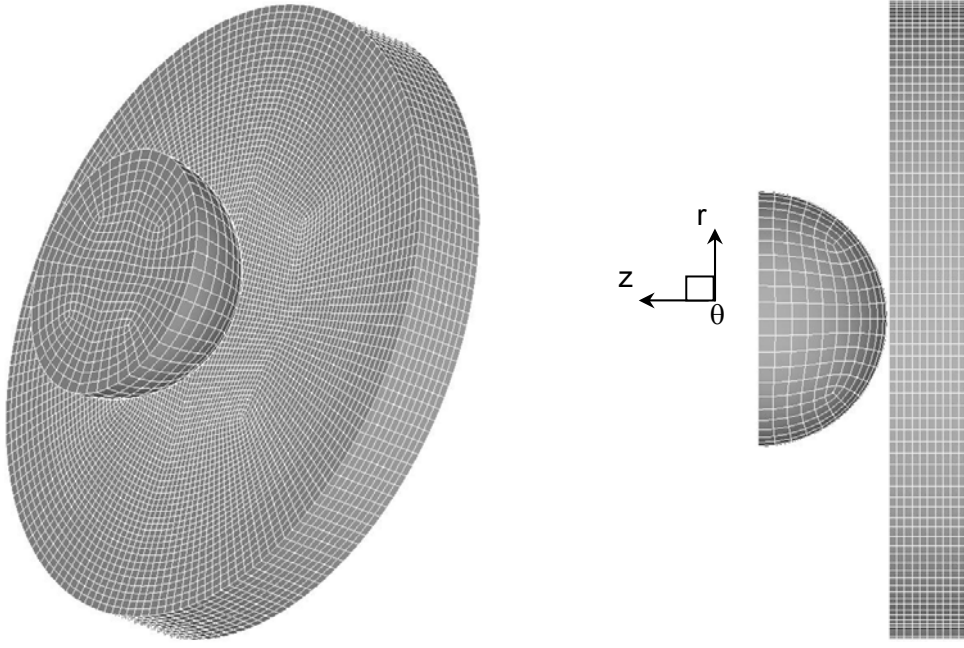
$$\varepsilon_2 = \varepsilon_0 \left(\frac{\sigma_2}{\sigma_0} \right)^{n_0} \quad (12)$$

Burada $\varepsilon_0 = \frac{\sigma_0}{E_2}$ metalin akma şekil değiştirme değeridir. Şekil 4 kompozitin TTO model tarafından hesaplanan gerilme-şekil değiştirme eğrisini şematik olarak göstermektedir.



Şekil 4. TTO modelin şematik gerilme-şekil değiştirme eğrisi [22,23].

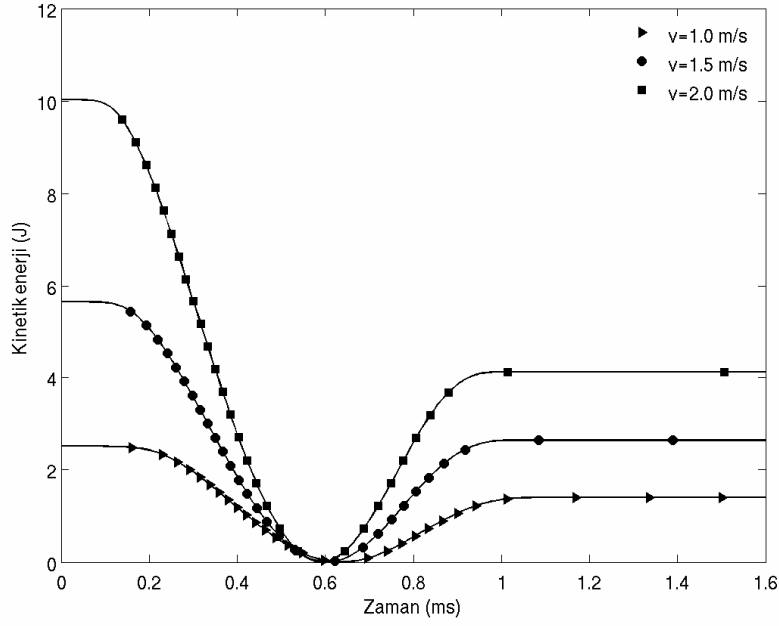
Çarpma analizleri explicit sonlu elemanlar kodu LS-DYNA [24] kullanılarak yapıldı. Fonksiyonel kademelendirilmiş malzemeler için bir elasto-plastik model kod içine gömüldü. Çarpışma esnasındaki dinamik temas kuvvetlerinin hesaplanabilmesi için vurucu ve fonksiyonel kademelendirilmiş dairesel plakanın seramik-zengin üst yüzeyi arasında surface-to-surface temas modeli kullanıldı. Vurucu ve fonksiyonel kademelendirilmiş plakalar 8 düğüm noktalı katı eleman kullanılarak modellendi. Deneysel sınır şartları dikkate alınarak, dairesel plakanın alt ve üst yüzeylerinde merkezden 20 mm yarıçap dışındaki tüm düğüm noktaları x, y z yönlerinde sabitlenmiştir. (Şekil 1b). Dairesel plakalar, kalınlığı boyunca 10 elemana bölünmüş ve herbir eleman bir katmanı temsil etmektedir. Yapılan seri analizler, artan mesh yoğunluğunun sonlu elemanlar çözümünde hesaplama süresini önemli ölçüde artırdığını buna karşın çözüm hassasiyeti üzerinde önemli bir etkisinin olmadığını göstermiştir. Bu nedenle, vurucu ve plaka için Şekil 5’de gösterilen sonlu eleman meshi kullanılmıştır. Tüm simülasyonlar 8 işlemcili 2.5GHz, 32GB RAM kapasiteli iş istasyonunda yapılmıştır. Analizler için üç farklı vurucu hızı ($v = 1.0, 1.5, \text{ ve } 2.0 \text{ m/s}$) kullanılmıştır. Bununla birlikte malzeme kompozisyonunun (n) Al/SiC fonksiyonel kademelendirilmiş dairesel plakaların düşük hızlı darbe davranışları üzerindeki etkisini görebilmek için analizler $n = 0.1, 0.5, 1.0, 5.0$ ve 10.0 için tekrarlanmıştır.



Şekil 5. Fonksiyonel kademelendirilmiş dairesel plakanın ve yarı küresel vurucunun sonlu eleman modeli.

4. BULGULAR

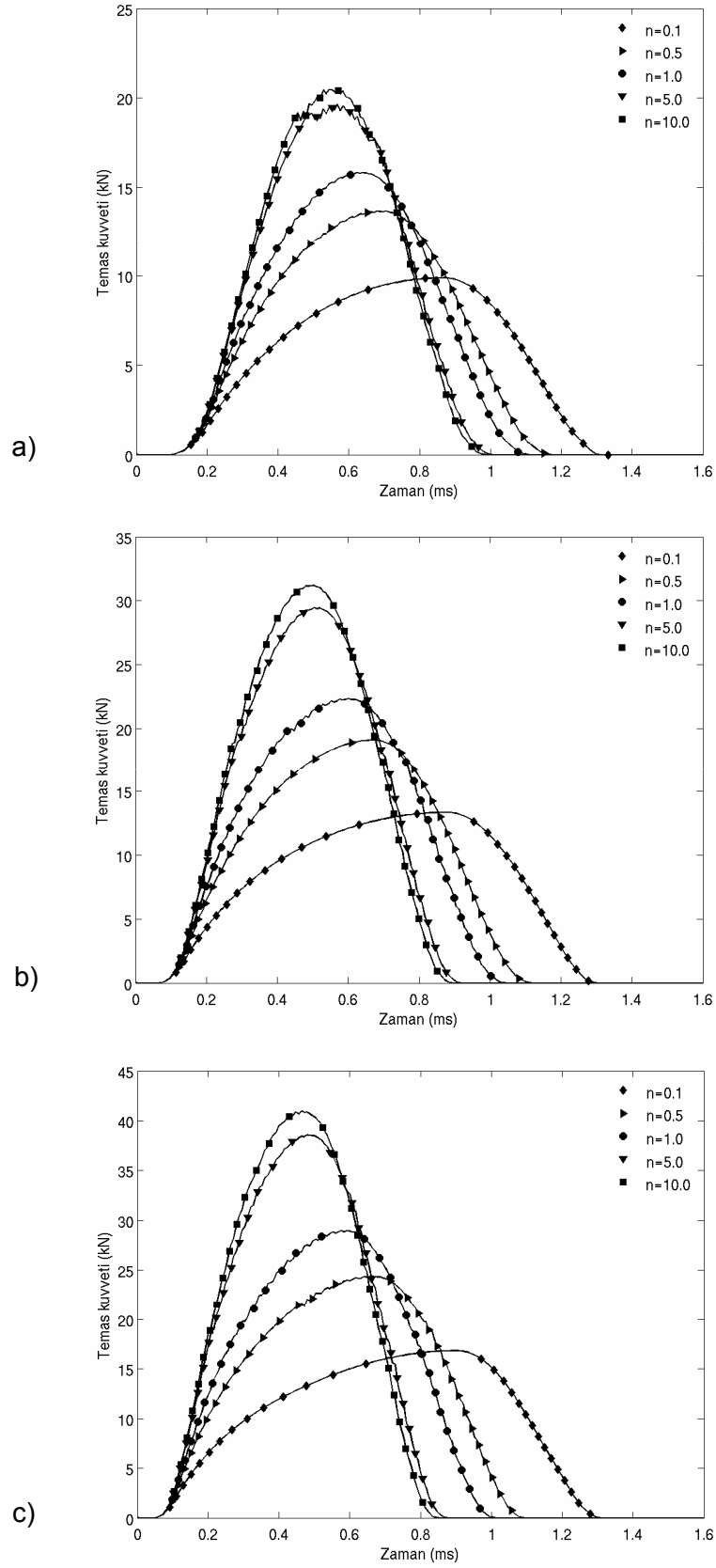
Şekil 6’da vurucu hızları $v = 1.0, 1.5$ ve 2.0 m/s için vurucunun kinetik enerji historileri görülmektedir ($n = 1.0$). Artan vurucu hızı ile kinetik enerji artmakta ve temas süresi azalmaktadır. Ayrıca, vurucu hızları $1.0, 1.5$ ve 2.0 m/s için sırasıyla vurucu kinetik enerjilerinin %10, %27 ve %44 lik kısımları fonksiyonel kademelendirilmiş dairesel plaka tarafından plastik deformasyon olarak absorbe edilmiştir. Absorbe edilen enerji artan vurucu hızıyla önemli oranda artmaktadır.



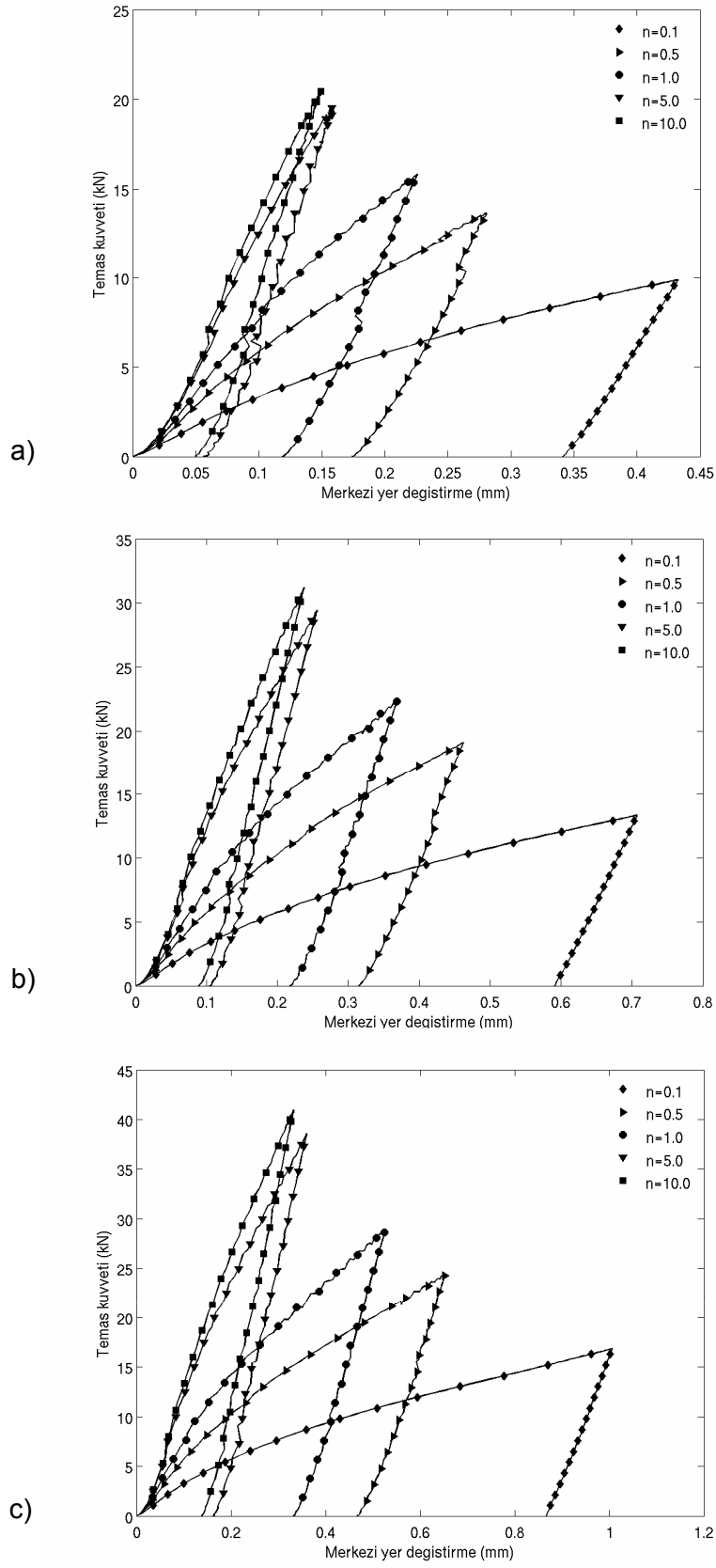
Şekil 6. Farklı vurucu hızları için kinetik enerji historisi ($n = 1.0$)

Şekil 7’de farklı vurucu hızlarında ($v = 1.0, 1.5$ ve 2.0 m/s) kompozisyonel gradyantin ($n = 0.1, 0.5, 1.0, 5.0$ ve 10.0) temas kuvveti historisine etkisi görülmektedir. Artan kompozisyonel gradyant ile temas kuvveti artmakta ve temas süreleride kısalmaktadır. Ayrıca plaka kalınlığı boyunca malzeme kompozisyonu seramik-zengin ($n = 10.0$) bir yapıdan metal-zengin ($n = 0.1$) bir yapıya değıştikçe temas kuvvetinin eğimi dikkate değır ölçüde azalmaktadır. Bunun nedeni, azalan malzeme kompozisyonu ile plaka metal-zengin bir yapıya kavuşmakta ve TTO model gereğince plastik deformasyon için daha fazla şekil değıştirme enerjisini absorbe edebilmektedir. Yine artan vurucu hızı ile temas kuvveti artmakta ve temas süresinin ise azaldığı görülmektedir.

Şekil 8’de kompozisyonel gradyantin ($n = 0.1, 0.5, 1.0, 5.0$ ve 10.0) üç farklı vurucu hızında ($v = 1.0, 1.5$ ve 2.0 m/s) temas kuvveti-yerdeğıştirme ilişkileri görülmektedir. Burada malzeme kompozisyonunun seramik-zenginden metal-zengine değışmesiyle fonksiyonel kademelendirilmiş dairesel plakanın rijitliği azalmakta, bu durum plakada oluşan kalıcı deformasyon değırinin artmasıyla sonuçlanmaktadır. Artan vurucu hızı ile de hem temas kuvvetlerinin hemde kalıcı deformasyon miktarlarının arttığı gözlemlenmiştir.



Şekil 7. Kompozisyonel gradyantın (n) fonksiyonel kademelendirilmiş dairesel plakanın temas kuvveti historisine etkisi a) $v = 1.0$ m/s, b) $v = 1.5$ m/s ve c) $v = 2.0$ m/s.



Çarpma yüklerine maruz Al/SiC fonksiyonel kademelendirilmiş dairesel plakaların elasto-plastik cevapları konusunda deneysel bir inceleme de yapılmıştır. Deneyler 10 mikron Alüminyum (Al6061) tozu ve 50 mikron Silisyum Karbür (SiC) tozlarının belirli hacimsel oranlarda karıştırılmasıyla üretilen dairesel numuneler kullanılarak yapılmıştır. Kalınlıkları boyunca 10 katmanlı olarak üretilen fonksiyonel kademelendirilmiş dairesel numunelerin seramik bileşeni, kompozisyonel gradyanın (n) alacağı değere bağlı olarak kalınlık boyunca % 0'dan %80'e kadar lineer ($n=1$) ve nonlineer ($n \neq 1$) olarak değişmektedir. Buna göre, en alt katman saf metal iken en üst katman %20 metal, %80 seramik içermektedir (Şekil 1). Fonksiyonel kademelendirilmiş plakalar beş farklı malzeme kompozisyonunda hazırlanmış olup, Şekil 3'de metal alt yüzey (100/0) ile seramik-zengin üst yüzey (20/80) arasında plakanın kalınlığı boyunca $n = 0.1, 0.5, 1.0, 5.0$ ve 10.0 için seramiğin hacimsel oranındaki değişim görülmektedir. Al/SiC fonksiyonel kademelendirilmiş dairesel numuneler 50 mm çapında ve 6 mm kalınlığında olup her bir katman yaklaşık olarak 0.6 mm kalınlığa sahip olacak şekilde tasarlanmıştır.



Şekil 9. Fonksiyonel kademelendirilmiş dairesel plakalar

Tüm numuneler toz istifleme-sıcak presleme yöntemiyle üretildi. İyi bir mekanik alaşımlama elde etmek için Alüminyum ve Silisyum Karbür tozları belirlenmiş farklı oranlarda 5 saat süreyle özel olarak tasarlanmış bir karıştırıcıda karıştırıldı. Gerekli miktarda karıştırılmış Al ve SiC tozları tartılarak sıcak iş çeliğinden üretilmiş olan dairesel bir kalıbın içerisine transfer edildi ve kalınlığı doğrultusunda 1 dakika süreyle 70 MPa basınçla maruz bırakıldı ve daha sonra basınç kaldırıldı, böylece ilk katman oluşturulmuş oldu. Daha sonra diğer katmanlar içinde bu işlemler tekrarlandı. Herbir katmanın kalınlığının aynı olması sağlandı. Kalıp içinde soğuk olarak sıkıştırılmış numune daha sonra 100MPa basınç altında 640-650 °C'de 1 saat süreyle sinterlendi. Sinterleme işlemi koruyucu Argon gazı atmosferinde yapıldı. Daha sonra numunelerin çarpılmalarını önlemek amacıyla basınç altında kontrollü olarak soğutulularak kalıptan çıkarıldılar (Şekil 9).



Şekil 10. CEASt Fractovis ağırlık düşürme darbe cihazı

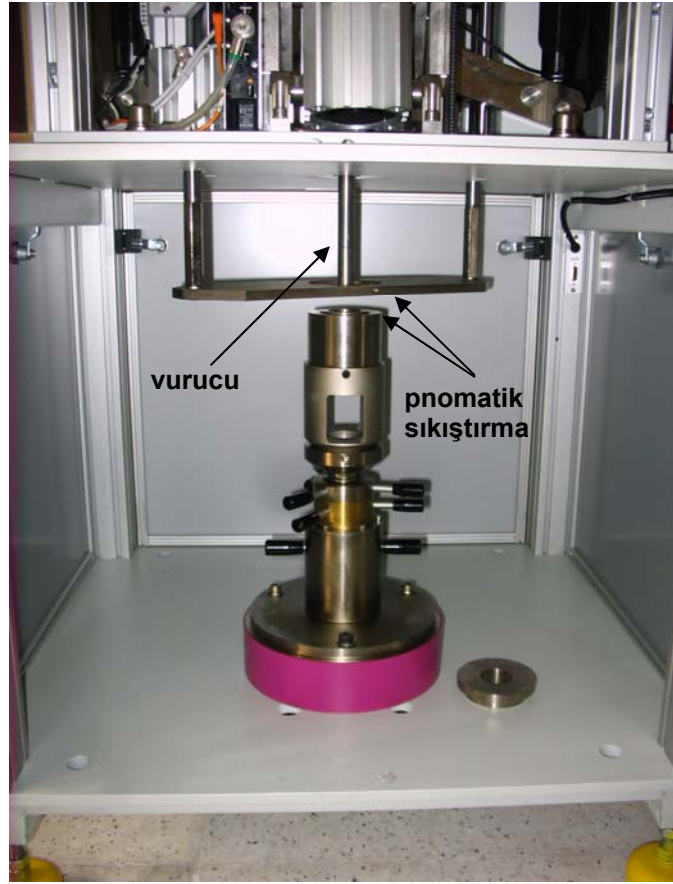
Fonksiyonel kademelendirilmiş plakalara ($n = 0.1, 0.5, 1.0, 5.0$ ve 10.0) sırasıyla $v = 1.0, 1.5$ ve 2.0 m/s çarpma hızlarına tekabül eden $2.52, 5.67$ ve 10.09 Joule çarpma enerjilerinde testler yapıldı. Çarpma enerjileri vurucunun düşürülme yüksekliği değiştirilerek ayarlandı. Deneyler için CEASt Fractovis ağırlık düşürme test cihazı kullanıldı (Şekil 10). Numuneler seramik zengin yüzeyinden çarpmaya maruz bırakıldı ve vurucunun tekrarı çarpmasını önlemek için anti-rebound sistem (Şekil 11) kullanıldı. Vurucu yarıçapı 20 mm olan yarıküresel bir geometriye sahip olup 40 kN kapasiteli bir kuvvet transdüserüne bağlıdır ve toplam kütlesi ise 5.045 kg'dır. 50 mm çapında olan fonksiyonel kademelendirilmiş dairesel

numuneler, iç çapı 40 mm olan dairesel bir destek tarafından pnomatik bir sistem ile tutulmaktadır (Şekil 12). Çarpma testleriyle elde edilen veriler bir veri toplama sistemi yardımıyla (DAS16000) alınmakta ve VisualIMPACT programı ile yük trandüserinden gelen yük historisinden zamana bağlı hız, yer değıştirme ve absorbe edilen enerji değerleri hesaplanmaktadır.

Çarpma testleri beş farklı malzeme kompozisyonuna ($n = 0.1, 0.5, 1.0, 5.0$ ve 10.0) üç farklı çarpma hızında ($v = 1.0, 1.5$ ve 2 m/s) yapıldı.



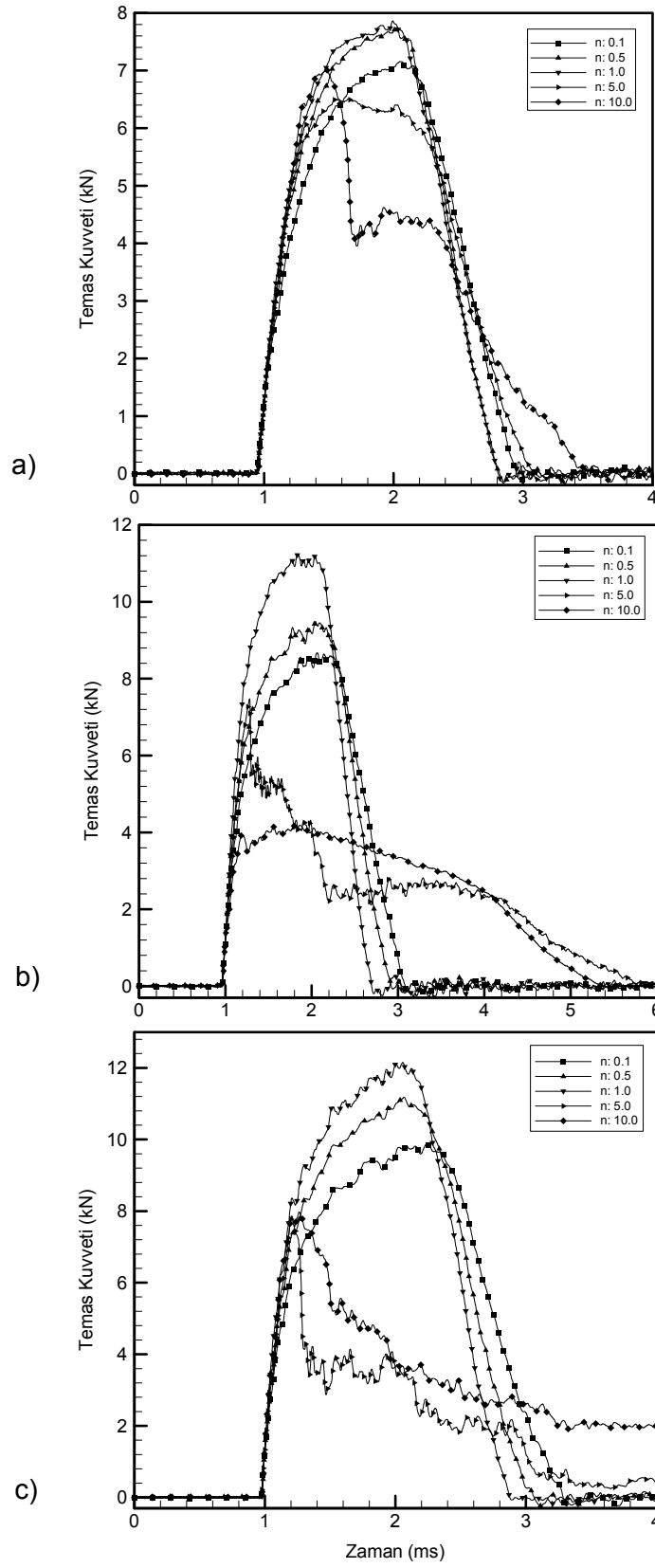
Şekil 11. Anti-rebound sistem



Şekil 12. Çarpma cihazı numune bağlantı aparatı

Şekil 13’de deneysel olarak, farklı vurucu hızlarında ($v = 1.0, 1.5$ ve 2 m/s) fonksiyonel kademelendirilmiş plaka kalınlığı boyunca kompozisyonel gradyanın ($n = 0.1, 0.5, 1.0, 5.0$ ve 10.0) temas kuvveti historisine etkisi görülmektedir. Tüm hızlarda malzeme kompozisyonu metal-zengin ($n = 0.1$) bir yapıdan lineer ($n = 1.0$) bir yapıya doğru gittikçe temas kuvvetinin arttığı, buna karşın lineer ($n = 1.0$) bir yapıdan seramik-zengin ($n = 10.0$) bir yapıya doğru değişen malzeme kompozisyonlarında ise meydana gelen hasar nedeniyle temas kuvvetlerinin azaldığı görülmektedir. Kompozisyonel gradyan değeri arttıkça ($n > 1.0$) daha kırılğan bir yapıya kavuşan plakaların çarpma yükleri altında hasara uğradıkları görülmüştür. Hasarın oluşmadığı plakalarda, artan kompozisyonel gradyan değeri ile daha rijit yapıya kavuşan plakalar ve vurucu arasındaki temas süresinin ise azaldığı da görülmektedir.

Şekil 14’te metal-zengin malzeme kompozisyonuna ($n = 0.1$) sahip Al/SiC fonksiyonel kademelendirilmiş dairesel plakalarda vurucu hızına bağlı olarak artan temas kuvveti nedeniyle fonksiyonel kademelendirilmiş plakada oluşan plastik deformasyonun da arttığı görülmektedir.

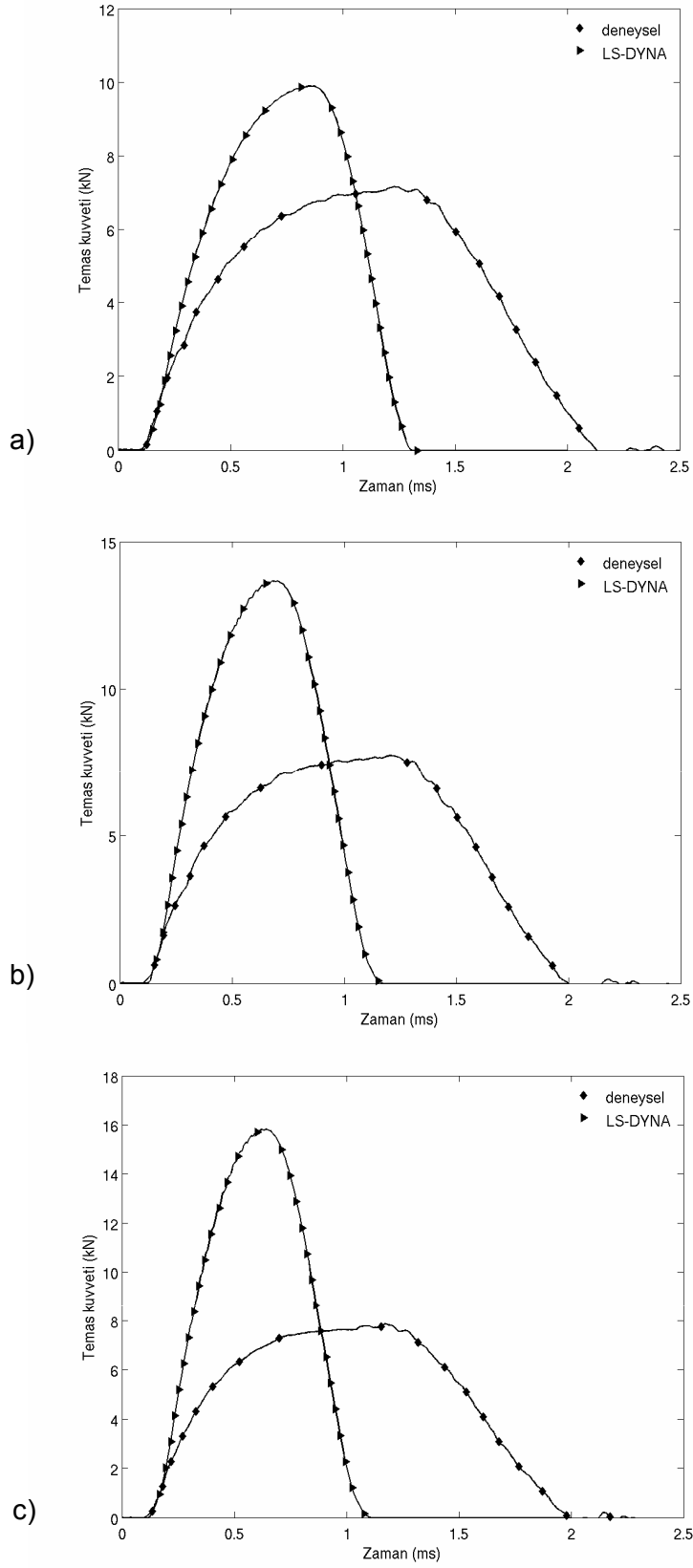


Şekil 13. Fonksiyonel kademelendirilmiş dairesel plakaların kalınlıkları boyunca malzeme kompozisyonunun ve vurucu hızının temas kuvveti değişimine etkisi a) $v=1\text{ m/s}$, b) $v=1.5\text{ m/s}$, ve c) $v=2\text{ m/s}$. (vurucu kütlesi=5.045kg)

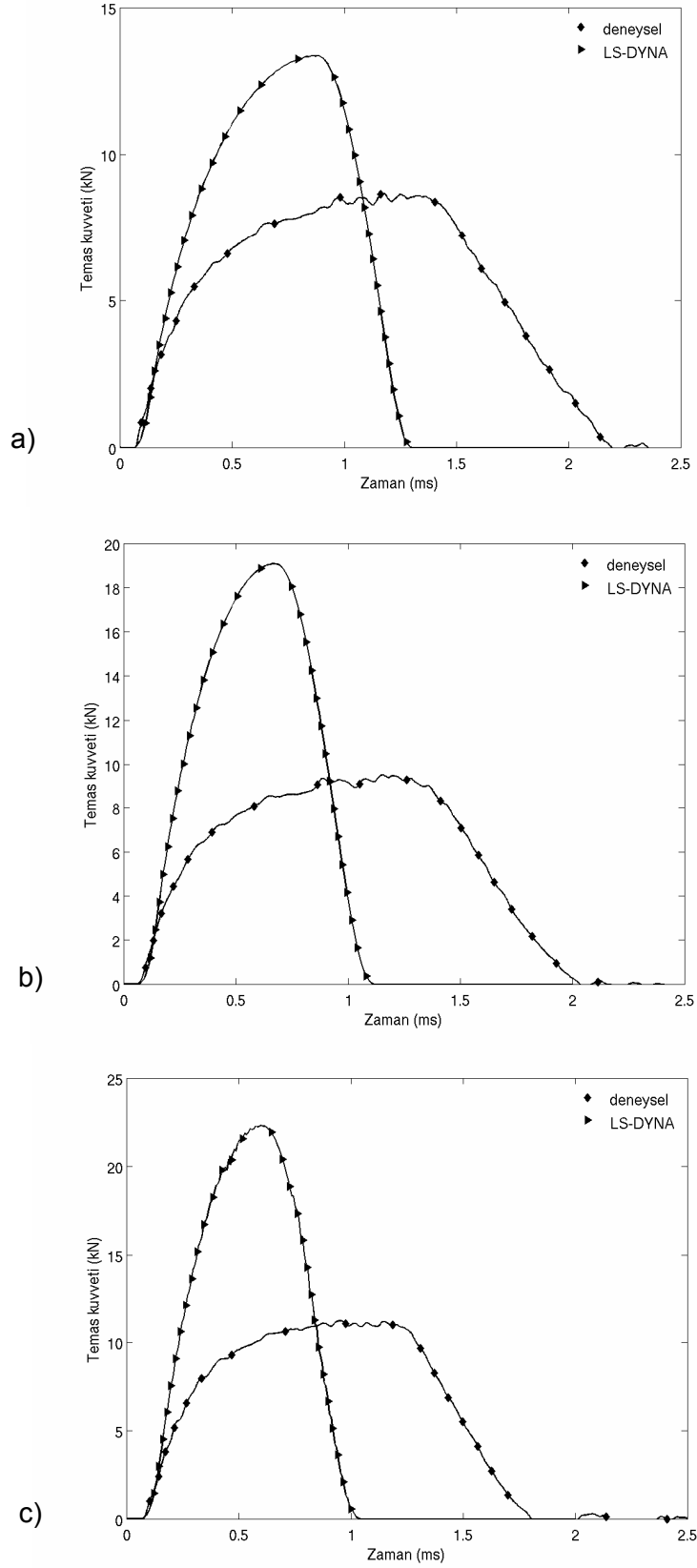


Şekil 14. Vurucu hızının plastik deformasyona etkisi ($n = 0.1$)

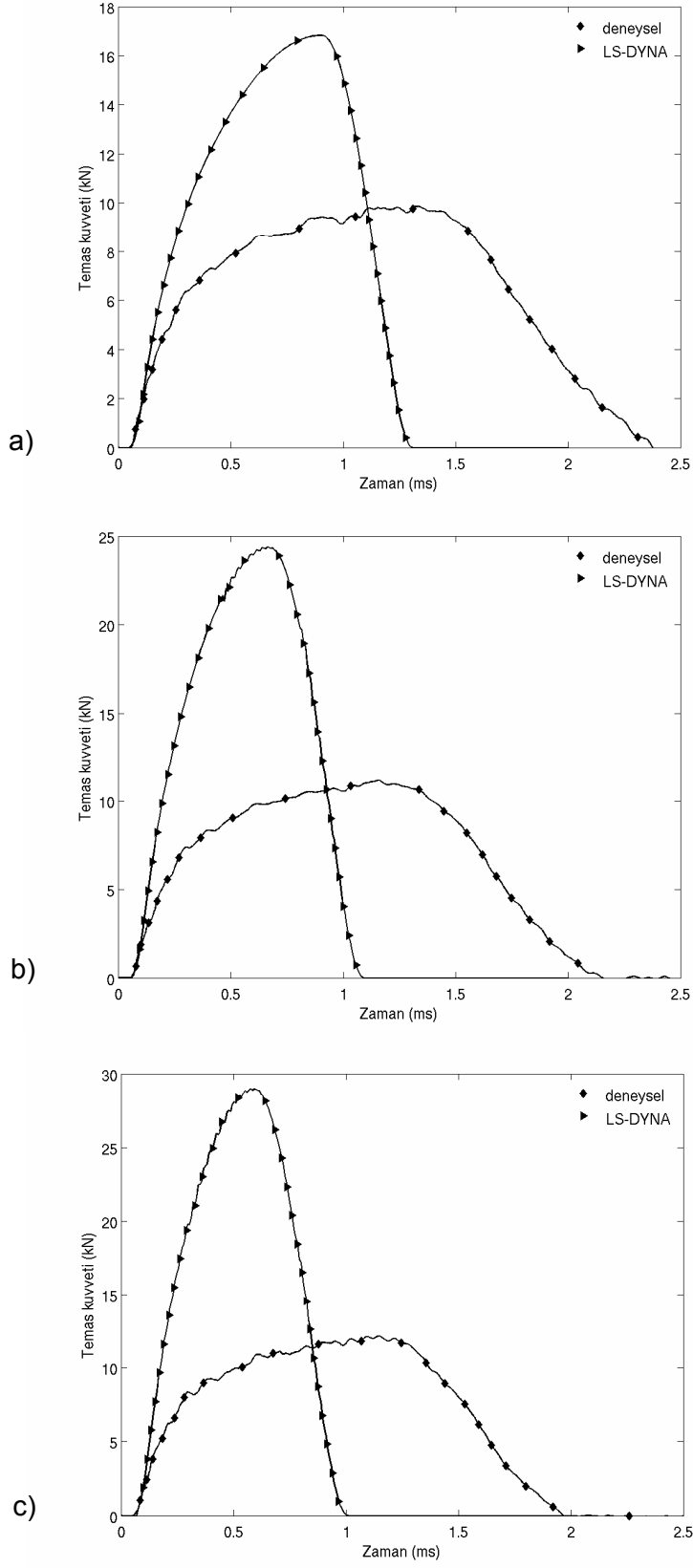
Şekil 15-17’da hasarın oluşmadığı malzeme kompozisyonları için ($n = 0.1, 0.5$ ve 1.0) üç farklı vurucu hızında ($v = 1.0, 1.5$ ve 2.0 m/s) gerçekleştirilen deneysel çarpma testleri ile aynı şartlardaki sayısal analizlerden elde edilmiş olan temas kuvvetlerinin zamana göre değişimleri görülmektedir. Sayısal analizler için de alt yüzeyi %100 Al, üst yüzeyi %20 Al-%80 SiC olacak şekilde toplam 10 katman olarak modellenen Al/SiC fonksiyonel kademelendirilmiş dairesel plaka 6 mm kalınlığa sahiptir ve vurucu ise rijit olarak modellenmiştir. Deneysel çalışmadaki sınır şartlarına uygun olarak sayısal analizlerde de 50 mm çapındaki dairesel plakanın kenarlarından 5 mm mesafeden alt ve üst yüzeyler her yönde sabitlenmiştir. Sonuçlar göstermektedir ki, yapılan elasto-plastik analizlerde toplam çarpma süresi deneysel sonuçlara kıyasla daha kısa buna karşın temas kuvveti değerleri ise daha yüksektir. Söz konusu bu farkın temel nedeni olarak sayısal model daha katı davranırken, üretilen deney numunelerinin çarpma yüklerine karşı gereken mukavemeti tam anlamıyla gösterememeleri söylenebilir. Burada laboratuvar şartları dahilinde numunelerin üretimi için seçilen üretim tekniği önemli bir parametredir. Henüz literatürde böyle bir çalışmaya rastlanılmamış olması nedeniyle elde edilen sonuçların ileriki çalışmalar için önemli bir basamak teşkil edeceği düşünülmektedir.



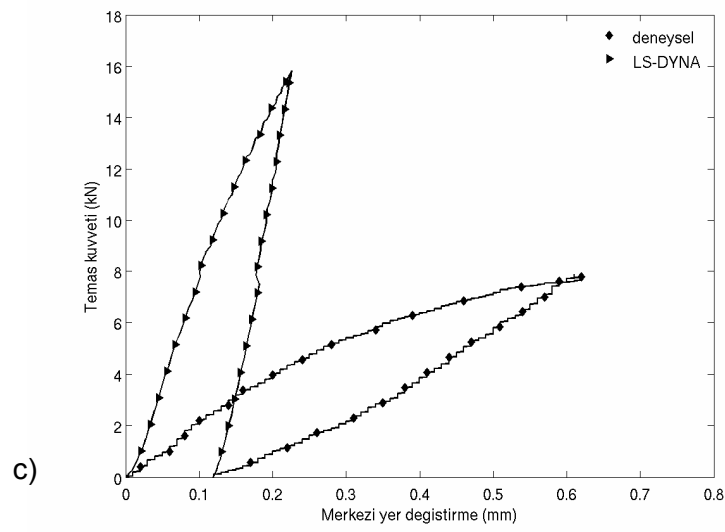
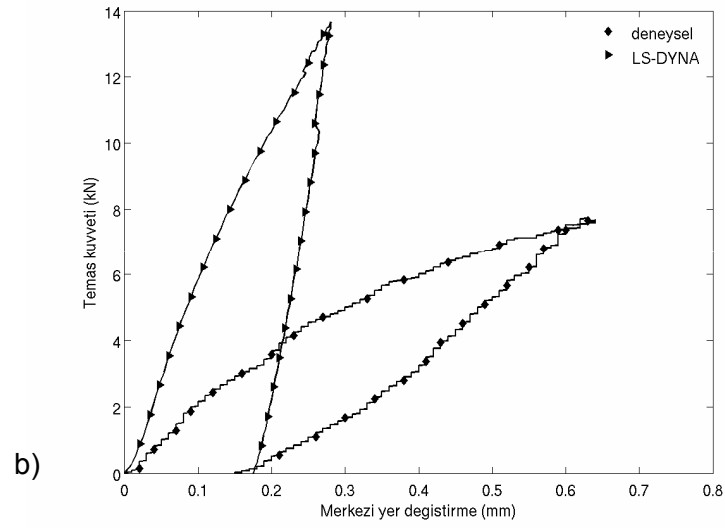
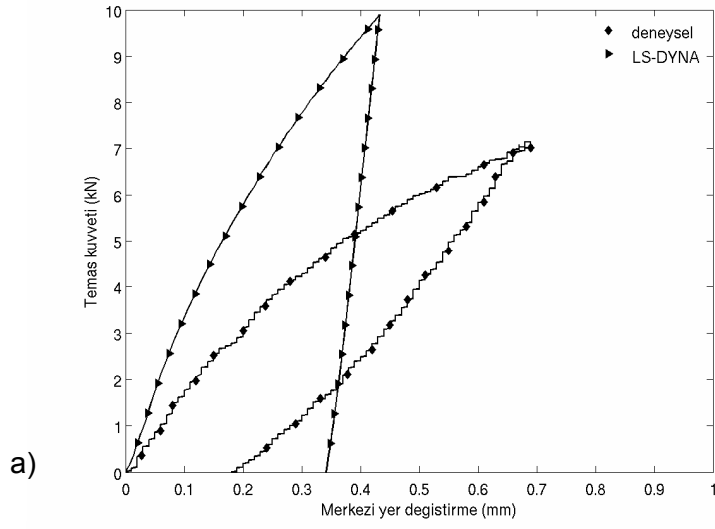
Şekil 15. Fonksiyonel kademelendirilmiş dairesel plakalarda sayısal ve deneysel temas kuvvetlerinin zamana göre değişimi a) $n = 0.1$, b) $n = 0.5$, c) $n = 1.0$ ($v = 1$ m/s)



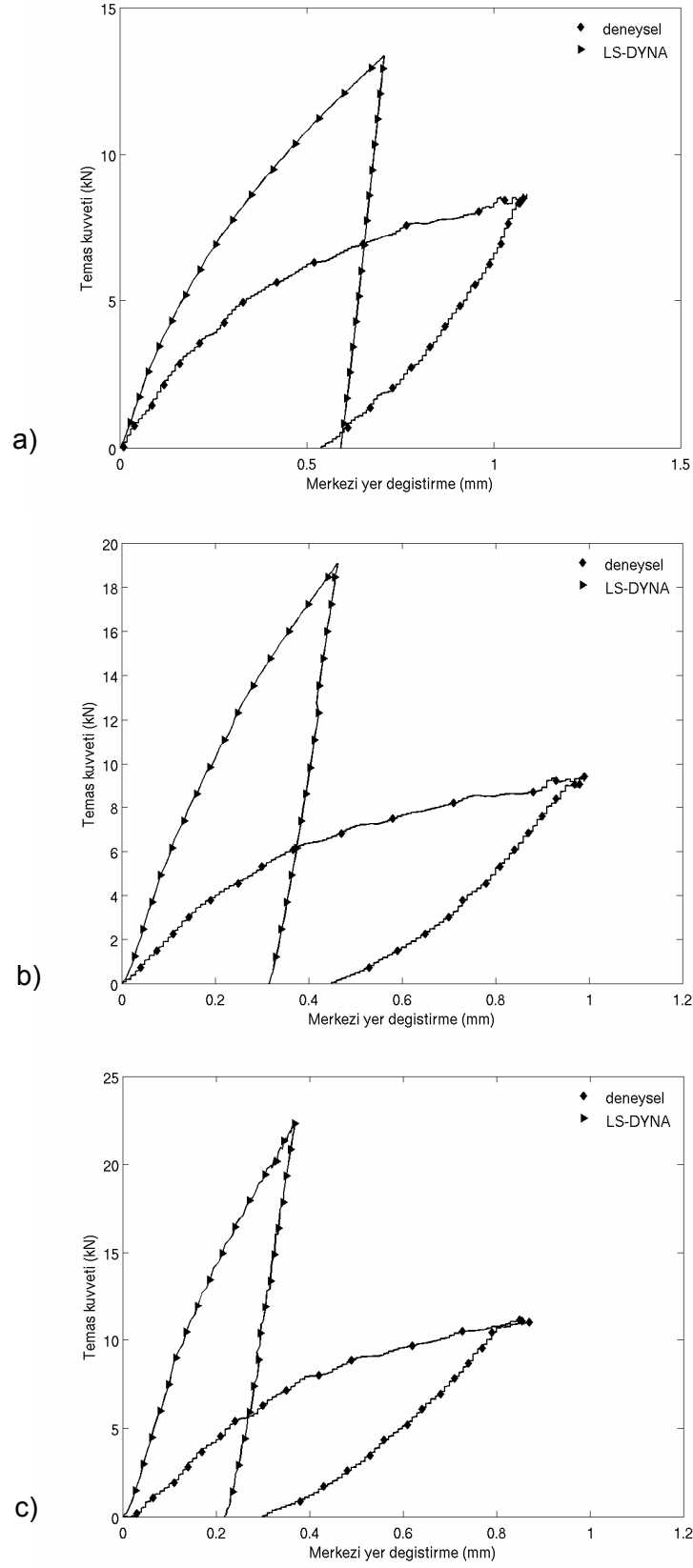
Şekil 16. Fonksiyonel kademelendirilmiş dairesel plakalarda sayısal ve deneysel temas kuvvetlerinin zamana göre değişimi a) $n = 0.1$, b) $n = 0.5$, c) $n = 1.0$ ($v = 1.5$ m/s)



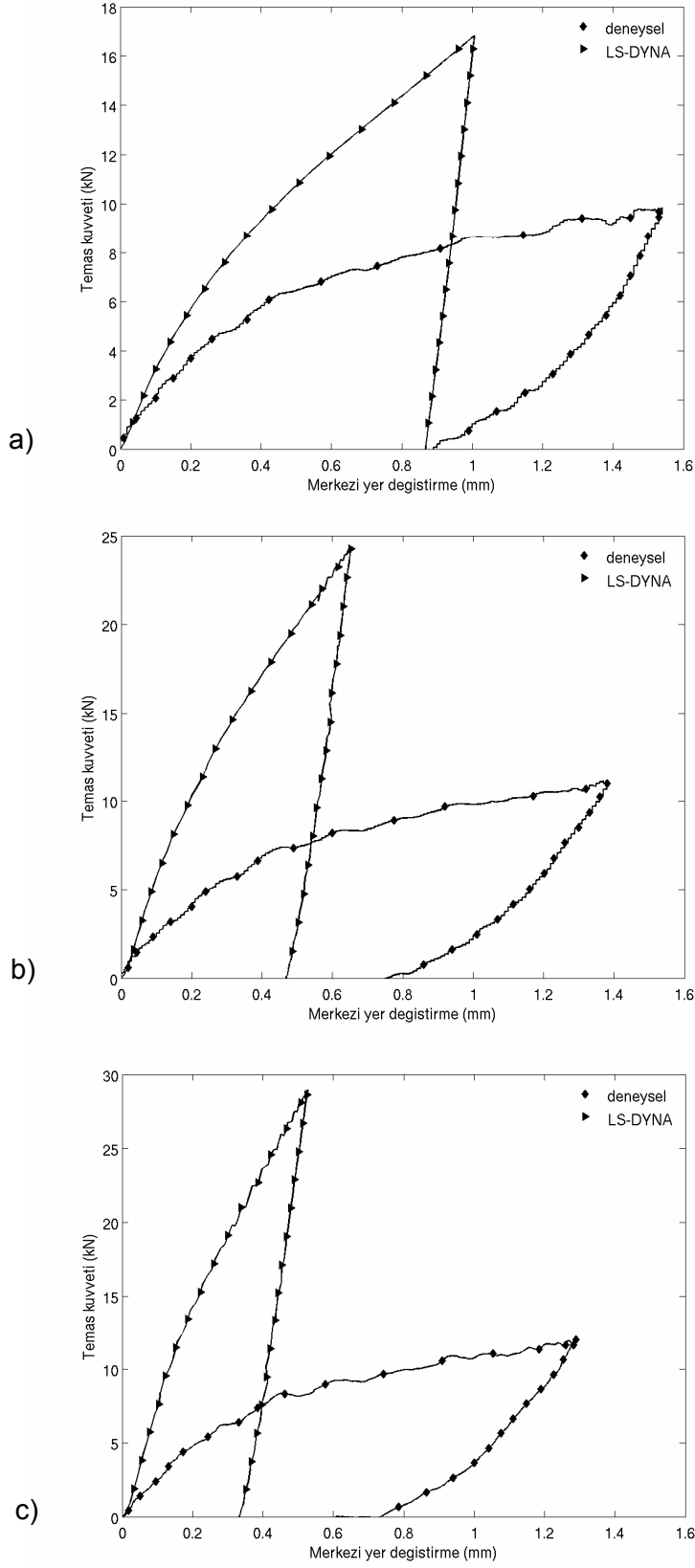
Şekil 17. Fonksiyonel kademelendirilmiş dairesel plakalarda sayısal ve deneysel temas kuvvetlerinin zamana göre değişimi a) $n = 0.1$, b) $n = 0.5$, c) $n = 1.0$ ($v = 2$ m/s)



Şekil 18. Sayısal ve deneysel temas kuvveti-yerdeğıstirme ilişkisi a) $n = 0.1$, b) $n = 0.5$, c) $n = 1.0$ ($v = 1 \text{ m/s}$)



Şekil 19. Sayısal ve deneysel temas kuvveti-yerdeğiştirme ilişkisi a) $n = 0.1$, b) $n = 0.5$, c) $n = 1.0$ ($v = 1.5$ m/s)



Şekil 20. Sayısal ve deneysel temas kuvveti-yerdeğiştirme ilişkisi a) $n = 0.1$, b) $n = 0.5$, c) $n = 1.0$ ($v = 2.0$ m/s)

Şekil 18-20 sayısal ve deysel olarak elde edilmiş temas kuvveti-yer değiştirme ilişkileri görülmektedir. Artan vurucu hızı ile temas kuvveti ve yer değiştirme değerleri artmaktadır. Tüm vurucu hızlarında ($v = 1.0, 1.5$ ve 2.0 m/s) kompozisyonel gradyant (n) arttıkça merkezi yer değiştirme değeri azalırken temas kuvveti değerlerinin ise bir miktar arttığı görülmektedir. Sayısal ve deneysel olarak elde edilen temas kuvveti-yer değiştirme eğrileri mukayese edildiğinde; sayısal olarak modellenen fonksiyonel kademelendirilmiş plakalarda daha yüksek temas kuvvetiyle daha düşük merkezi yer değiştirmelerin meydana geldiği görülmektedir. Bunun nedeni ise yukarıda da bahsedildiği gibi sayısal modelin daha katı bir yapıya sahip olması ve deneysel olarak üretilen numunelerin üretiminden kaynaklanan sebeplerden dolayı daha düşük mukavemetli bir yapıya sahip olmalarıdır. Kuvvet-yer değiştirme eğrisi altındaki alan plakalar tarafından absorbe edilen şekil değiştirme enerjisini ifade etmektedir. Buna göre sayısal analizlerde yüksek kuvvet, düşük yer değiştirme davranışı gözlenirken, deneysel analizlerde düşük kuvvet, yüksek yer değiştirme davranışının ortaya çıktığı görülmektedir. Böylece sayısal ve deneysel olarak hesaplanan absorbe edilen şekil değiştirme enerjileri birbirine yakın değerlerdedir.

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu proje çalışmasında fonksiyonel kademelendirilmiş dairesel plakaların sayısal olarak elasto-plastik analizleri yapılmış ve sonuçların deneysel olarak doğrulanması amaçlanmıştır. Elasto-plastik analizler ve deneyler $v=1, 1.5$ ve 2 m/s olmak üzere üç farklı vurucu hızında ve beş farklı malzeme kompozisyonu için ($n=0.1, 0.5, 1, 5$ ve 10) tekrarlanmıştır. Sayısal analizler için bir sonlu elemanlar paket programı olan LS-DYNA kullanılmıştır. Fonksiyonel kademelendirilmiş dairesel plaka kenarlarından ankastre bağlanmış ve seramik yüzeyden merkezi çarpmaya maruz bırakılmıştır. Kompozisyonu kalınlık boyunca değişen dairesel plaka, seramik (SiC) ve metal (Al) fazlardan oluşmuştur. Seramik ve metal katmanlar arasında kalan fonksiyonel kademelendirilmiş bölgenin mekanik özelliklerinin plaka kalınlığı boyunca sürekli olarak bileşenlerin hacimsel oranlarındaki değişime bağlı olarak bir kuvvet kanununa göre değiştiği varsayılmıştır. Elasto-plastik analizler için iki farklı bileşene sahip yapılarda bileşenlerin tek eksenli gerilme-şekil değiştirme değerlerini kullanarak nihai malzemenin gerilme şekil değiştirme eğrisinin oluşturulması için geliştirilmiş TTO model kullanılmıştır.

Çalışmada vurucu hızı ve malzeme kompozisyonunun temas kuvveti üzerine etkileri incelenmiş ve artan vurucu hızı ile temas kuvveti değerinin arttığı ve yine $n=0.1$ (metal

yoğun) ile $n=10$ (seramik yoğun) arasında artan malzeme kompozisyonu ile fonksiyonel kademelendirilmiş dairesel plakanın rijitliği artmış bu sebeple temas kuvveti değeri de artmıştır. Artan malzeme kompozisyonu değeri ile fonksiyonel kademelendirilmiş dairesel plakadaki merkezi yer değiştirme değeri azalmış ve temas süresi de kısalmıştır.

TTO model kullanılarak yapılan elasto-plastik sayısal analiz ile deneysel sonuca %65 oranında yaklaşılmıştır bu oranın daha da geliştirilmesi için gerek sayısal modelin gerekse deneysel şartların iyileştirilmesi çalışmalarına devam edilmektedir.

Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Kompozit Malzemeler Laboratuvarında beş farklı malzeme kompozisyonlarında üretilen fonksiyonel kademelendirilmiş numunelere farklı vurucu hızlarında ($v=1, 1.5$ ve 2m/s) gerçekleştirilen deneysel çarpma testleri sonucunda malzeme kompozisyonunun $n>1$ olduğu durumlarda numunelerde hasar meydana gelmiştir. Yapılan sayısal analizler elasto-plastik sınırlar içerisinde olduğundan hasarın oluştuğu durum için deneysel ve sayısal sonuçların karşılaştırılması mümkün olmamaktadır. Fonksiyonel kademelendirilmiş plakalar için geçerli bir hasar modeli mevcut değildir. Bir hasar modelinin geliştirilmesi gerekmektedir ki, bu sebeple ileriki çalışmalar için bir hasar modelinin geliştirilmesi düşünülmektedir.

5. KAYNAKLAR

1. Lakshminarayana, H.V., Boukhili, R. ve Gauvin, R., Impact Response of Laminated Composite Plates: Prediction and Verification, *Composite Structures*, 28, 61-72, 1994.
2. 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.
3. 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.
4. Mili, F. ve Necib, B., Impact Behavior of Cross-Ply Laminated Composite Plates Under Low Velocities, *Composite Structures*, 51, 237-244, 2001.
5. Guinard, S., Allix, O., Guédra-Degeorges, D. ve Vinet, A., A 3D Damage Analysis of Low-Velocity Impacts on Laminated Composites, *Composites Science and Technology*, 62, 585-589, 2002.
6. Krishnamurthy, K.S., Mahajan, P. ve Mittal, R.K., Impact Response and Damage in Laminated Composite Cylindrical Shells, *Composite Structures*, 59, 15-36, 2003.
7. Aslan, Z., Karakuzu, R. ve Okutan, B., The Response of Laminated Composite Plates Under Low-Velocity Impact Loading, *Composite Structures*, 59, 119-127, 2003.
8. Jiang, D. ve Shu, D., Stress Distribution in Damaged Composite Laminates Under Transverse Impact, *Composite Structures*, 63, 407-415, 2004.
9. 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.
10. 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.
11. 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.

12. 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.
13. 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.
14. 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.
15. 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.
16. 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.
17. T. Mori, K. Tanaka, Average stress in matrix and average elastic energy of materials with misfitting inclusions, Acta Metallurgica 21 (1973) 571-574.
18. Y. Benveniste, A new approach to the application of Mori-Tanaka's theory in composite materials, Mech. Mater. 6 (1987) 147-157.
19. I. Tamura, Y. Tomato, H. Ozawa, 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 (1973) 611-615.
20. R.L. Williamson, B.H. Rabin, J.T. Drake, Finite Element Analysis of Thermal Residual Stresses at Graded Ceramic/Metal Interfaces, Part I: Model Description and Geometrical Effects, Journal of Applied Physics 74 (1993) 1310-1302.
21. M. Bhattacharyya, S. Kapuria, A.N. Kumar, On the stress to strain transfer ratio and elastic deflection behavior for Al/SiC functionally graded material, Mech. Adv. Mater. Struct. 14 (2007) 295-302.

22. Z.H. Jin, R.H. Dodds, Cohesive growth resistance behaviour of a functionally graded material: computational studies, *Engineering Fracture Mechanics* 71 (2004) 1651-1672.
23. A.E. Giannakopoulos, S. Suresh, M. Finot, M. Olsson, Elastoplastic analysis of thermal cycling: Layered materials with compositional gradients, *Acta Metall. Mater.* 43 (1995) 1335-1354.
24. Livermore Software Technology Corporation (LSTC), 2009. LS-DYNA Keyword User's Manual, Version 971.