



POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.gov.tr/politeknik>



# Fonksiyonel kademelendirilmiş plakalarda kalınlık boyunca kompozisyonel değişimin balistik performans üzerindeki etkisinin incelenmesi

*An investigation of the ballistic performance of functionally graded plates have different compositional gradation through the plate thickness*

*Yazar(lar) (Author(s)): Murat AYDIN<sup>1</sup>, Emre ACAR<sup>2</sup>*

*ORCID<sup>1</sup>: 0000-0003-3713-3029*

*ORCID<sup>2</sup>: 0000-0003-1114-6251*

**Bu makaleye řu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** Aydın M. ve Acar E., “Fonksiyonel kademelendirilmiş plakalarda kalınlık boyunca kompozisyonel değişimin balistik performans üzerindeki etkisinin incelenmesi”, *Politeknik Dergisi*, 21(4): 951-960, (2018).

**Eriřim linki (To link to this article):** <http://dergipark.gov.tr/politeknik/archive>

**DOI:** 10.2339/politeknik.385490

# Fonksiyonel Kademelendirilmiş Plakalarda Kalınlık Boyunca Kompozisyonel Değişimin Balistik Performans Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi

*Araştırma Makalesi / Research Article*

**Murat AYDIN<sup>1\*</sup>, Emre ACAR<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Erciyes Üniversitesi, Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Uçak Mühendisliği Bölümü, Türkiye

(Geliş/Received : 08.09.2016 ; Kabul/Accepted : 24.10.2017)

## ÖZ

Bu çalışmada, fonksiyonel kademelendirilmiş plakalarda kalınlık boyunca bileşenlerin hacimsel değişim sürekliliğinin, balistik performans üzerindeki etkisi sayısal olarak incelenmiştir. Sayısal analizler eksplisit dinamik analiz yapabilen LS-DYNA sonlu elemanlar yazılımı kullanılarak yapılmıştır.

Seramik (SiC) ve metal (Al) bileşenlerden oluşan fonksiyonel kademelendirilmiş plakalarında kademelendirilmiş bölgedeki lokal malzeme özelliklerinin hesaplanmasında, mikro mekanik model olarak Mori-Tanaka şeması kullanılmıştır. Plakaların elasto plastik davranışlarının modellenmesi için de, iki farklı bileşene sahip yapılarda bileşenlerin, tek eksenli gerilme-şekil değiştirme değerlerini kullanarak kompozit malzemenin gerilme şekil değiştirme eğrisinin oluşturulması için geliştirilmiş olan TTO model kullanılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Fonksiyonel kademelendirilmiş malzemeler, balistik performans, sonlu elemanlar yöntemi.

# An Investigation of the Ballistic Performance of Functionally Graded Plates have Different Compositional Gradation Through the Plate Thickness

## ABSTRACT

In this study, the ballistic performance of functionally graded plates (FGSPs) which have different layer numbers have been investigated numerically. Numerical analyses were performed using LS-DYNA finite element software which can perform an explicit dynamic analysis. The functionally graded sandwich plate is composed of a mixture of ceramic (SiC) and metal (Al) constituents, Mori-Tanaka scheme was used to determine the effective material properties at any point inside functionally graded plates. In order to define the elasto-plastic behavior of the functionally graded layers, the TTO (Tamura-Tomota-Ozawa) model was used.

**Keywords:** Functionally graded materials, ballistic performance, finite element method.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

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 kullanılmaktadır [1].

Fonksiyonel kademelendirilmiş malzemeler, seramik-metal bağlantıların ara yüzeylerinde 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 malzemeler, kompozisyonundaki sürekli makroskopik değişimler nedeniyle artık gerilmelere sahiptirler ve bu artık gerilmeler fonksiyonel kademelendirilmiş malzemenin mekanik özelliklerini de etkiler.

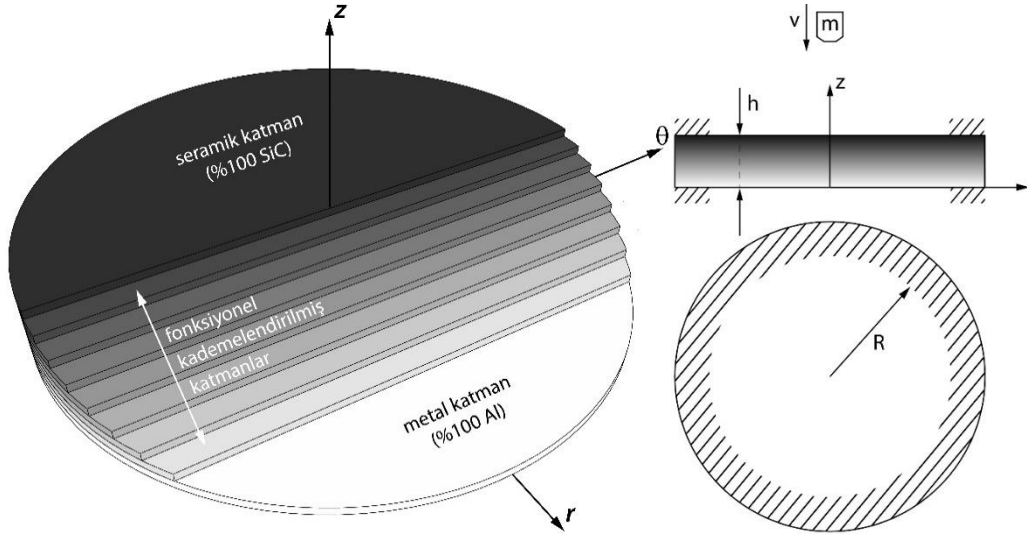
Fonksiyonel kademelendirilmiş malzemeler zor çalışma şartlarına sahip darbeli ortamlarda veya balistik amaçlı olarak da kullanılabilirler. Bu nedenle bu malzemelerin darbe dayanımlarının da belirlenmesi oldukça önemlidir.

### 1.1. Bünye İlişkileri ve Karışım Teorisi

Seramik (SiC) ve metal (Al) bileşenlerden oluşan fonksiyonel kademelendirilmiş plakaların en alt yüzeyi metal, en üst yüzeyi ise seramik olup her iki yüzey

\*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)  
e-posta : aydin@erciyes.edu.tr

arasında, bileşenlerin hacimsel oranları kademeli olarak değişmektedir (Şekil 1a). Söz konusu bu değişimin



Şekil 1. a) Fonksiyonel kademelendirilmiş dairesel plaka, b) Sayısal analiz sınır şartları ( a- A functionally graded circular plate and b- boundary condition)

sürekli olması katmanlar arası artık gerilmeyi ve termomekanik uyumsuzlukları azaltacaktır. Fonksiyonel kademelendirilmiş plakayı oluşturan her bir katman kendi içerisinde homojen olup, her bir katmanın ihtiva ettiği seramik ( $c$ ) ve metal ( $m$ ) bileşenlerin hacimsel oranları arasındaki ilişki;

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

Denklemleri ile ifade edilir. Bileşenlerin hacimsel oranlarının, plaka kalınlığı ( $h$ ) boyunca konumun fonksiyonu olarak değiştiği fonksiyonel kademelendirilmiş plakalarda, bu değişim,  $V_c(z)$  ve  $V_m(z)$  sırasıyla seramik ve metal bileşenin herhangi bir  $z$  mesafesindeki hacimsel oranları olmak üzere,

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

eşitlikleri ile ifade edilir. Bu denklemlerde,  $h$  plaka kalınlığı ve  $n$  bileşenlerin hacimsel değişimini lineer veya lineer olmayan şekilde kontrol eden üstür. Çeşitli  $n$  değerleri için plaka kalınlığı boyunca bileşenlerin hacimsel oranlarındaki değişim **Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.**'da gösterilmiştir. Bu çalışma kapsamında yapılan sayısal analizlerde, bileşenlerin plaka kalınlığı boyunca hacimsel oranlarındaki değişimin lineer olduğu ( $n=1$ ) kabul edilmiştir.

Analizlerde fonksiyonel kademelendirilmiş plakaların sayısal modellemesi için gerekli olan, kademelendirilmiş bölgedeki lokal malzeme özelliklerinin hesaplanmasında, mikro mekanik model olarak Mori-Tanaka şeması kullanılmıştır [2,3]. Bu modelde, fonksiyonel kademelendirilmiş malzemenin etkili hacim modülü  $K$  ve kayma modülü  $G$  şu şekilde ifade edilir;

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

$$\frac{G - G_m}{G_c - G_m} = \frac{V_c}{\left[1 + (1 - V_c) \frac{(G_c - G_m)}{G_m + f_1}\right]} \quad (4)$$

$$f_1 = \frac{G_m(9K_m + 8G_m)}{6(K_m + 2G_m)} \quad (5)$$

Elastisite modülü  $E$  ve Poisson oranı  $\nu$ 'yu hesaplamak için;

$$E = \frac{9KG}{3K + G} \quad \text{ve} \quad \nu = \frac{3K - 2G}{2(3K + G)} \quad (6)$$

eşitlikleri kullanılmıştır. Lineer karışım kuralına göre her bir katmanın yoğunluğu,  $\rho$  ise aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\rho = V_m \rho_m + V_c \rho_c \quad (7)$$

## 1.2. Tamura-Tomota-Ozawa (TTO) Model

Fonksiyonel kademelendirilmiş malzemelerin lineer-elastik davranışları klasik Hooke kanunu ile tariflenirken, elasto-plastik davranışlarını modellemek için Tamura ve diğerleri [4] tarafından ortaya atılan ve metal-seramik esaslı fonksiyonel kademelendirilmiş malzemelerin, hacimsel oranlarını temel alan TTO model kullanılmıştır. TTO model iki fazlı kompozitlerde, iki bileşenin, ortalama tek eksenli gerilme ve şekil değiştirme değerleri kullanılarak elde edilen, tek eksenli gerilme ( $\sigma$ ) ve şekil değiştirme ( $\epsilon$ ) değerleriyle ilişkilidir,

$$\sigma = V_c \sigma_c + V_m \sigma_m \text{ ve } \varepsilon = V_c \varepsilon_c + V_m \varepsilon_m \quad 8$$

Bu eşitlikte,  $\sigma_c$  ve  $\sigma_m$  sırasıyla seramik ve metal bileşenlerin ortalama gerilme ve  $\varepsilon_c$  ve  $\varepsilon_m$  sırasıyla seramik ve metal bileşenlerin şekil değiştirme değerlerini ifade etmektedir. TTO model, ilave bir parametre olan, gerilme-şekil değiştirme transfer oranı,  $q$ 'yu ise şu şekilde tanımlar:

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

$q$  parametresinin değeri, bileşenlerin malzeme özelliklerine ve kompozit yapı içerisindeki mikro yapısal etkileşimlerine bağlıdır. Örneğin,  $q=\infty$  iken bileşen elemanların yüklenme doğrultusundaki deformasyonları özdeşdir, hâlbuki  $q=0$  iken bileşen elemanlar aynı gerilme seviyelerine sahiptirler. Genellikle, kompozit yapı içerisindeki bileşen elemanlar, karmaşık mikro yapıları (tane şekillerindeki fark, doğrultu, hacimsel oran vb.) nedeniyle, farklı gerilme ve şekil değiştirme değerlerine sahiptirler.  $q$ 'nun sıfırdan farklı, sonlu bir değeri, yaklaşık olarak bileşenlerin etkilerini yansıtabilir. Çalışma kapsamında yapılan sayısal analizlerde  $q=4,8\text{GPa}$  olarak alınmıştır söz konusu değer Güneş ve arkadaşları [5] tarafından deneysel olarak hesaplanmıştır. Seramik-metal kompozitlerin plastik deformasyonu uygulamalarında TTO model, metal bileşen akmaya başlayınca, kompozitin aktığını varsayar ve kompozitin akma gerilmesi  $\sigma_Y$  şu şekilde tariflenir

$$\sigma_Y = \sigma_0 \left[ V_m + \frac{q + E_m E_c}{q + E_c E_m} (1 - V_m) \right] \quad 10$$

Burada  $\sigma_0$ , metalin akma gerilmesidir. Yukarıdaki denklem göstermektedir ki, kompozitin akma gerilmesi; metalin akma gerilmesi, metalin hacimsel oranı, bileşenlerin elastisite modülleri ve  $q$  parametresine bağlıdır. Kompozitin akma noktasından sonraki gerilme-şekil değiştirme ( $\sigma$ - $\varepsilon$ ) eğrisini veren parametrik denklem

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

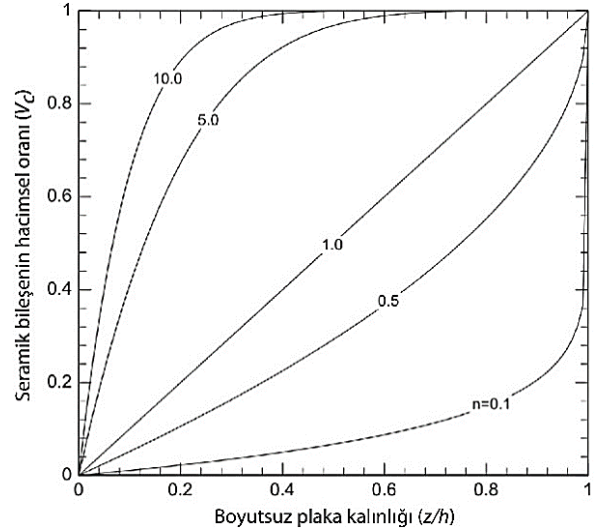
$$\frac{\sigma}{\sigma_Y} = \frac{V_2 q + E_1}{q + E_1} \frac{\sigma_2}{\sigma_Y} + \frac{(V_1 q E_1)}{(q + E_1) E_2} \frac{\sigma_0}{\sigma_Y} \left( \frac{\sigma_2}{\sigma_0} \right)^{n_0} \quad 12$$

şeklinde tariflenir. Burada  $\varepsilon_Y = \sigma_Y / E$  kompozitin akma şekil değiştirme değeri,  $n_0$  ise metal bileşenin sertleşme katsayısıdır. Metal bileşen için sertleşme katsayısı,  $n_0$  en küçük kareler metodu ile Denklem 13. kullanılarak hesaplanmıştır.

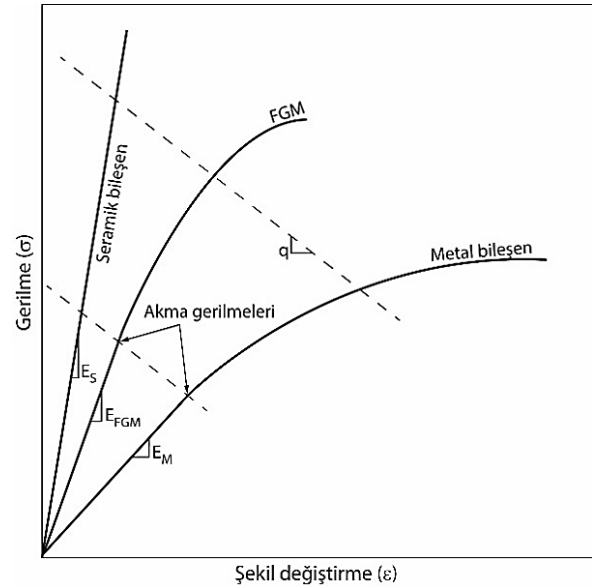
$$\varepsilon_m = \varepsilon_m \left( \frac{\sigma_m}{\sigma_0} \right)^{n_0} \quad 13$$

Burada  $\varepsilon_0 = \sigma_0 / E_m$  metal bileşenin akma şekil değiştirmesidir. **Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.** b'de TTO Model ile tariflenen kompozitin, gerilme-şekil değiştirme eğrisini şematik olarak gösterimi verilmiştir.

Fonksiyonel kademelendirilmiş malzemelerin üretimi, genel olarak toz metalürjisi ile kademelendirilmiş yapının elde edilmesi ve daha sonra sinterlenmesi esasına dayanır [6-8]. Bu malzeme konseptinde, kademelendirilmiş yapı oluşturulurken katmanları oluşturan bileşenlerin hacimsel oranları belirli doğrultularda sürekli olarak değişmesi ile mekanik özellikler de değişecektir.



(a)



(b)

Şekil 2. a) Fonksiyonel kademelendirilmiş dairesel plakanın kalınlığı boyunca farklı kompozisyonel gradyanlarda seramik bileşenin hacimsel oranı ( $V_c$ )

b) TTO Modelin şematik gerilme-şekil değiştirme eğrisi. (a- Through the thickness distribution of the volume fraction of the ceramic phase in the functionally graded circular plate, b- Schematic of the stress-strain curve of the TTO model)

Yüksek sıcaklık ortamlarında çalışan fonksiyonel kademelendirilmiş malzemelerde, katmanlar arası

mekanik özelliklerin ani değişimi sebebiyle ısı gerilmelerin olduğu ve katman ara yüzeylerinde termo-mekanik uyumsuzluklar meydana geldiği rapor edilmiştir [9-12]. Bahse konu bu olumsuzluk, plaka kalınlığı boyunca mümkün olduğunca çok katman kullanılarak giderilebilir, bu sayede yapıyı oluşturan katmanların incilmesi ile bir yüzeyden diğer bir yüzeye, mekanik özellik değişimi kademeli değil sürekli olacaktır. Toz istifleme, toz püskürtme döküm, santrifüj, lazer kaplama ve difüzyon gibi çeşitli yöntemler kullanılarak üretilen fonksiyonel kademelendirilmiş malzemeler için, oluşturulabilecek minimum katman kalınlığı üretim yöntemi ile direkt olarak ilişkilidir. Örneğin toz istifleme sıcak presleme yöntemi kullanılarak üretilen fonksiyonel kademelendirilmiş bir malzemenin katman kalınlığı büyük ( $>1mm$ ) ve orta ( $100-1000\mu m$ ) ölçekte olabilirken santrifüj yöntemi ile çok ince film ( $<10\mu m$ ) katmanlar ile sürekli bir değişim elde edilebilir [8]

Havacılık, uzay, otomotiv ve enerji gibi birçok özellikli alanlarda kullanılan fonksiyonel kademelendirilmiş malzemelerden yapılmış plakaların farklı yüklemeye ve sınır şartlarında lineer olmayan mekanik davranışlarının tespiti ve bu bilgiler ışığında gerilmeleri minimize edecek ve kullanım ömrünü uzatacak optimum malzeme kompozisyona sahip yapıların belirlenmesi son derece önemlidir. Literatürde termal yükler altında fonksiyonel kademelendirilmiş malzemelerin üretim optimizasyonunun yapıldığı birçok çalışma mevcut olup balistik darbe yükleri altındaki davranışlarının incelendiği çalışmalar oldukça sınırlı sayıdadır.

Bu çalışma ile fonksiyonel kademelendirilmiş dairesel plakalarda, plaka kalınlığı boyunca bileşenlerin hacimsel oranlarının değişim sürekliliğinin balistik performans üzerindeki etkisi sayısal olarak incelenmiştir. Fonksiyonel kademelendirilmiş plakaların mikro yapısı esas alınarak oluşturulan numerik modelin sayısal analizleri bir sonlu elemanlar yazılımı olan LS-DYNA programı ile yapılmıştır.

## 2. PROBLEM TARİFİ (PROBLEM DESCRIPTION)

Çalışma kapsamında gerçekleştirilen sayısal analizlerde, açık dinamik analiz yapabilen LS-DYNA sonlu elemanlar yazılımı kullanılmış olup 15mm kalınlığa sahip fonksiyonel kademelendirilmiş plakalar Şekil 1b'de gösterilen ve dış çapı 90mm ve iç çapı 70mm olan bölgelemlerden ankastre olarak mesnetlenerek merkezi

çarpma yüküne maruz bırakılmışlardır. Analizler, plaka kalınlığı boyunca 4 farklı katman sayısına sahip (5,10, 15 ve 20) fonksiyonel kademelendirilmiş plakalar ve 500m/s ile 750m/s mermi hızları için tekrarlanmıştır. Analizlerde modellemesi yapılan 4 farklı fonksiyonel kademelendirilmiş plaka tipi için her bir plakayı oluşturan katmanların ihtiva ettiği seramik ve metal oranları Şekil 3a'da verilmiş olup plaka kalınlığı boyunca bileşenlerin hacimsel değişim oranları da Şekil 3b ile verilen grafikte görülmektedir.

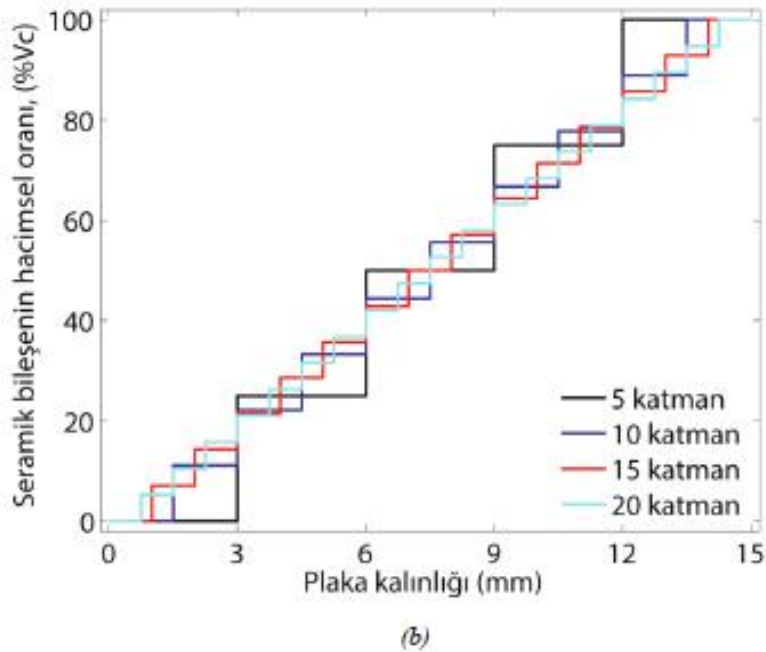
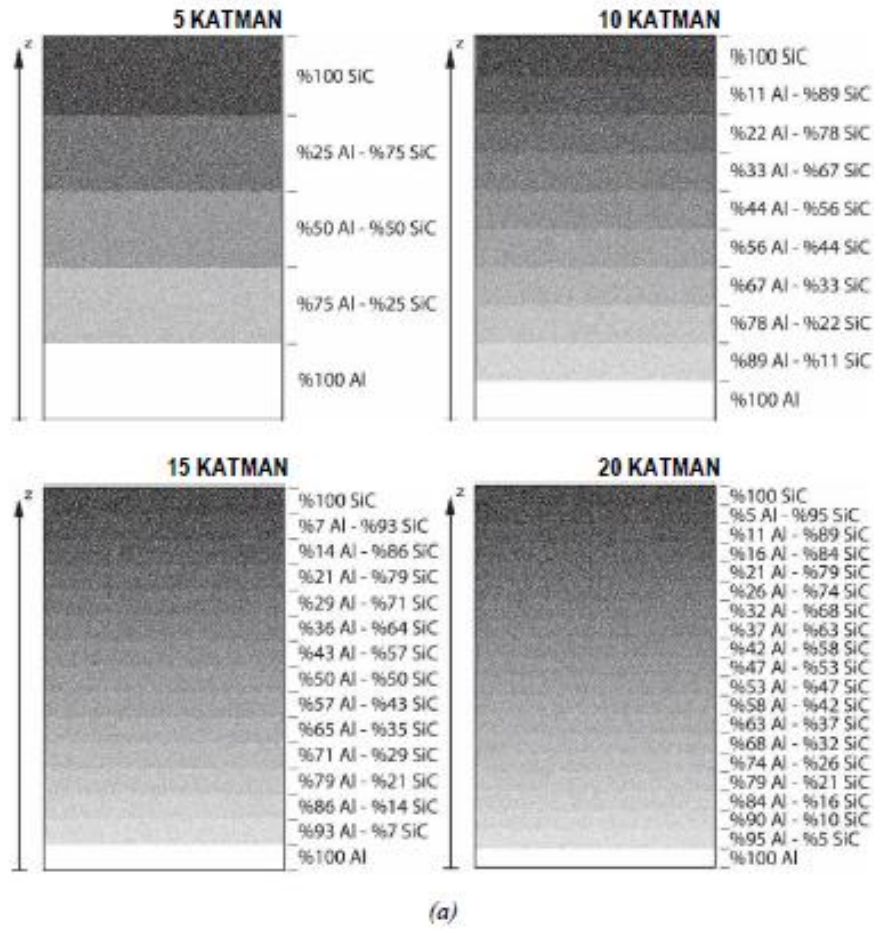
Balistik darbe analizlerinde 2,85g kütleyle sahip vurucu, STANAG 2920 [13] ve MIL-DTL-46593B (MR) [14] standartları ile tanımlanmış ve geometrisi Şekil 4'te verilmiş olan ISI 4340H çeliğinden üretilmiş, 0,3 kalibre parçacık benzetimli mermi (Fragment Simulating Projectiles, FSP) dikkate alınarak modellenmiştir. Bu standartlar ile tanımlanmış parçacık benzetimli mermiler isabet ettikleri hedef üzerinde patlamalı silah mermilerinin oluşturacakları deformasyonuna benzer etki oluşturmaları sebebiyle gerçek test şartları simule edilmiş olacaktır. Fonksiyonel kademelendirilmiş plakalar kompozisyonu kalınlık boyunca değişen seramik (Silisyum Karbür-SiC) ve metal bileşenlerden (Alüminyum-Al) oluşmaktadır. Seramik ve metal katmanlar arasında kalan fonksiyonel kademelendirilmiş bölgenin mekanik özelliklerinin hesaplanmasında 1.Bölümde tanımlanan, Mori-Tanaka şeması ve TTO model kullanılmıştır.

Sayısal analizlerde, vurucu için plastik kinematik (Plastic Kinematic) ve fonksiyonel kademelendirilmiş plakalar için parçalı lineer plastisite (Piecewise Linear Plasticity) malzeme modelleri kullanılmış olup fonksiyonel kademelendirilmiş plaka ve parçacık benzetimli mermi mekanik özellikleri Çizelge 1'de verilmiştir. Sonlu elemanlar modeli Şekil 5'te gösterilen fonksiyonel kademelendirilmiş plaka ve 0,3 kalibre parçacık benzetimli mermi için 8 düğüm noktalı, her bir düğümde 9 serbestlik dereceli bulunan SOLID 164 eleman tipi tercih edilmiştir. Model için ağ bağımsızlığı yapılarak, yaklaşık olarak 1570000 eleman kullanılmıştır.

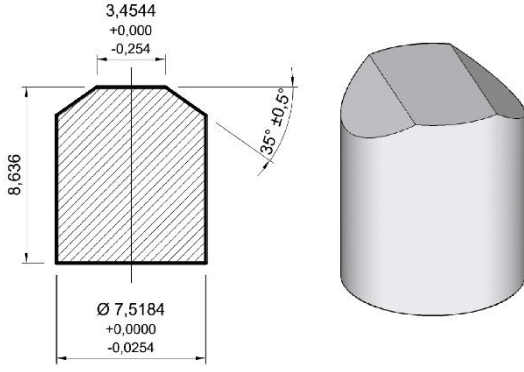
Çarpma analizlerinde temas modelinin oluşturulması oldukça kritik bir adımdır. Sayısal analizlerde mermi ile fonksiyonel kademelendirilmiş plaka arasında, düğüm noktalarının temas ettiği yüzeye, temasla birlikte penetre olduğu durumlarda kullanılan CONTACT\_ERODING\_NODE\_TO\_SURFACE temas algoritması kullanılmıştır.

**Çizelge 1.** Fonksiyonel kademelendirilmiş plaka bileşenleri ve mermi mekanik özellikleri (Mechanical properties of constituents of functionally graded circular plate and projectile.)

Malzeme	Elastisite Modülü (GPa)	Poisson Oranı	Yoğunluk ( $kg/m^3$ )	Akma Gerilmesi (MPa)	Tanjant Modülü (MPa)
Al 6061	67	0,33	2702	95	-
SiC	302	0,17	3100	-	-
Çelik (AISI 4340)	200	0,29	7850	970	470



**Şekil 3.** a) Farklı katman sayılarına sahip fonksiyonel kademelendirilmiş plakaların her bir katmanının ihtiva ettiği seramik ve metal hacimsel oranları b) Plaka kalınlığı boyunca seramik bileşenin hacimsel oranının değişimi (a- volumetric ratios of ceramic and metal for all layers of each functionally graded plates, b- volume fraction of the ceramic phase in each layers of the functionally graded circular plates)



Şekil 4. 0,3 kalibre parçacık benzetimli mermi (0.3 caliber fragment simulating projectile)

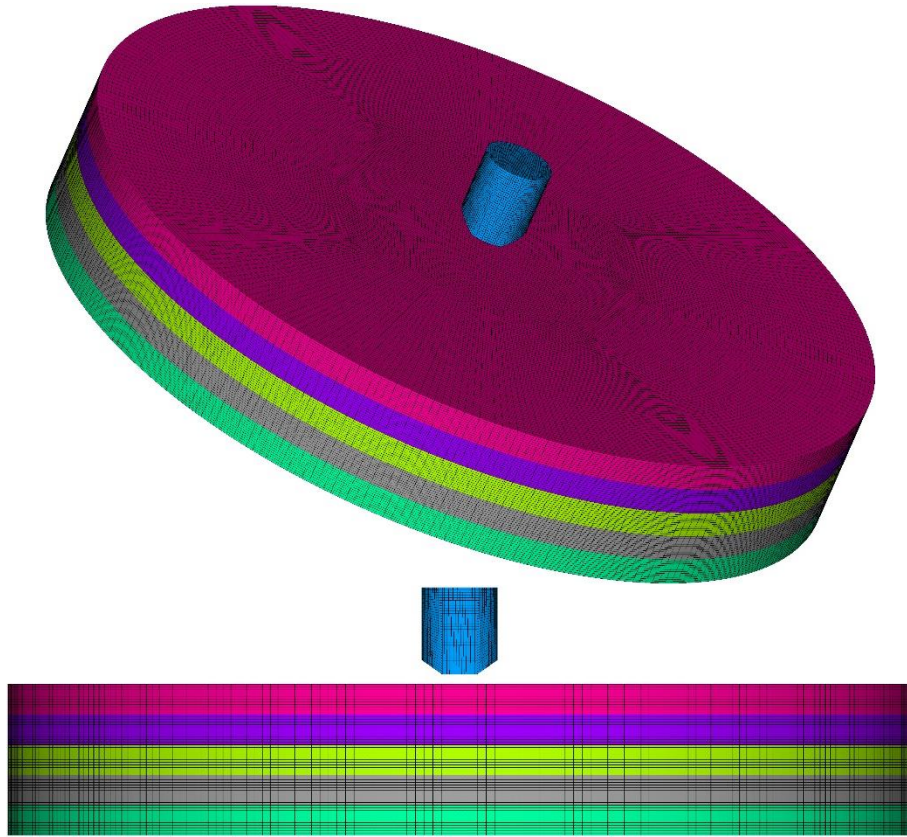
Bu temas tipi genellikle iki yüzey arasında meydana gelen genel temaslarda ve yüzeylerden biri ya da her ikinde de hasar oluşması durumlarında, temasın yüzey altındaki elemanlar üzerinde de etkili olmasına izin verildiği katı elemanlara penetrasyon problemlerinde ve diğer yüzey hasarına uğrayan problemlerde kullanılır. Ayrıca mermi ve plakaya ait elemanlarda oluşacak bozulmaları engellemek için 5. tip HOURGLASS tanımlanmıştır.

Fonksiyonel kademelendirilmiş silindirik plakalar, kalınlıkları boyunca 5,10,15 ve 20 katman olarak modellenmiş olup mermi ile fonksiyonel kademelendirilmiş plakalar arasında sürtünmenin

olmadığı, fonksiyonel kademelendirilmiş plakaların sönümleme etkisinin ihmal edildiği, çarpma boyunca yerçekimi ivmesinin olmadığı, katman ara yüzey bağlarının mükemmel olduğu, her bir katmanın kendi içerisinde homojen olduğu kabulleri yapılarak sayısal analizler gerçekleştirilmiştir.

### 3. NUMERİK SONUÇLAR (NUMERICAL RESULTS)

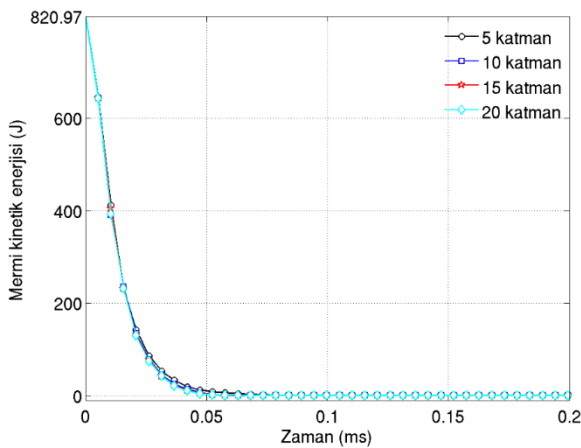
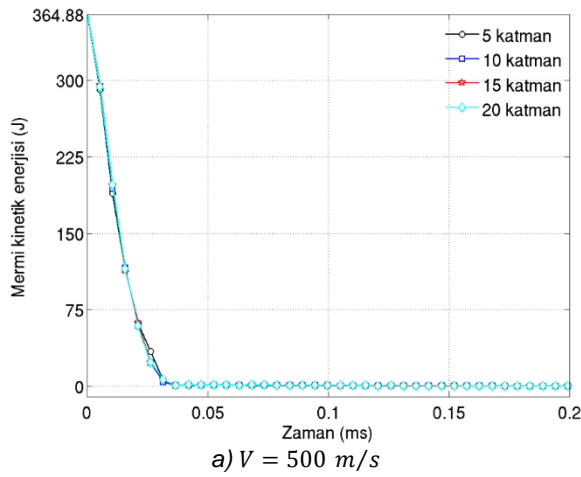
Sayısal analizlerde 2,85g kütleli 0,3 kalibre parçacık benzetimli mermi sabit 500m/s ve 750m/s 'lik hızlarda Şekil 3a'da gösterilen kalınlığı boyunca 4 farklı katman sayısına sahip fonksiyonel kademelendirilmiş plakalara çarpıtılmıştır. Analizlerde fonksiyonel kademelendirilmiş plakaların en üst katmanı (çarpma yüzeyi) %100 SiC olup plaka alt yüzeyi de %100 alüminyumdur, ara katmanlar ise, kompozisyonu bileşenlerin hacimsel oranlarındaki değişime bağlı olarak bir kuvvet kanununa göre tanımlanmıştır. Seramik malzemeler, balistik sistemlerde kullanılacak bir malzemeden beklenen yüksek sertlik, termal direnç ve basma dayanımına sahip olsa da kırılabilir bir yapıya sahip olmalarından dolayı tek başına bu amaç için kullanılmazlar.



Şekil 5. Fonksiyonel kademelendirilmiş plaka ve 0,3 kalibre parçacık benzetimli mermi sonlu elemanlar modeli (Finite element model of the functionally graded circular plate and projectile)

Zırh sistemlerinde genellikle ön yüz malzemesi olarak kullanılan seramikler, merminin delici ucunu deforme ederken arka yüzeyde kullanılan sünek (metal, polimer vs.) malzemeler enerjiiyi absorbe ederek merminin durdurulmasını sağlamakta, mermi ve parçacıkları tutarak tam nüfuziyeti engellemektedir [15-16].

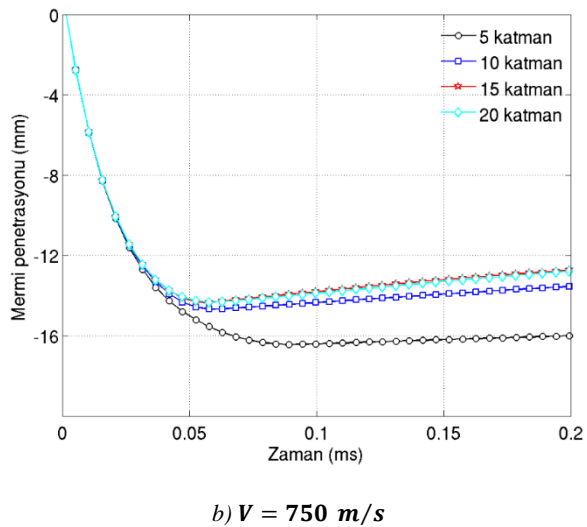
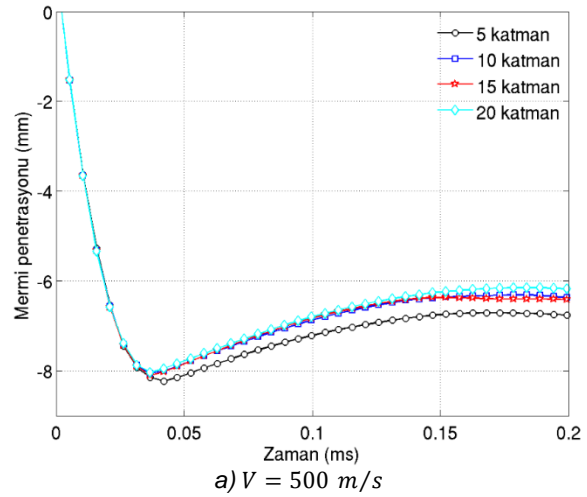
**Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.**'da iki farklı hız için 0,3 kalibre parçacık benzetimli merminin sahip olduğu kinetik enerjinin zamana göre değişim grafikleri verilmiştir. Grafikler incelendiğinde her iki hız değeri için, fonksiyonel kademelendirilmiş plakanın sahip olduğu katman sayısının, mermi kinetik enerjisi değişimi üzerinde neredeyse etkisiz olduğu görülmektedir. Mermi hızının artması ile penetrasyon süreleri artmış ve mermilerin sahip oldukları kinetik enerjinin (sırasıyla 364,88J ve 820,97J) tamamı plaka deformasyonu için harcanmıştır ancak plakalarda delinme (perforasyon) olmamıştır.



**Şekil 6.** 0.3 kalibre parçacık benzetimli mermi kinetik enerjisinin zamana göre değişimi (Kinetic energy histories of 0.3 caliber fragment simulating projectile)

**Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.**'de iki farklı hız için 0,3 kalibre parçacık benzetimli merminin, plakalar

içerisine nüfuziyetinin zamana göre değişim grafikleri verilmiştir. Her iki grafikte de mermi nüfuziyeti 5 katmana sahip plaka için diğer plakalara kıyasla önemli olmayan mertebede biraz daha fazla olmuştur. 15 mm kalınlığa sahip fonksiyonel kademelendirilmiş plakalara, 500m/s hızda çarptırılan 0,3 kalibre parçacık benzetimli mermi, 5 katmana sahip plaka içerisine toplamda 8,23mm, 10 katmana sahip plaka içerisine toplamda 8,11mm, 15 katmana sahip plaka içerisine toplamda 8,06mm ve 20 katmana sahip plaka içerisine toplamda 8,04mm nüfuz edebilmiştir.



**Şekil 7.** 0.3 kalibre parçacık benzetimli mermi penetrasyonunun zamana göre değişimi (Penetration histories of 0.3 caliber fragment simulating projectile)

Merminin 5 katmana sahip fonksiyonel kademelendirilmiş plaka nüfuziyeti ile 20 katmana sahip plaka nüfuziyeti arasında 0,17mm seviyesinde önemsiz sayılabilecek bir fark olmuştur. 750m/s mermi hızı için de benzer sonuçlar gözlemlenmiş olup, plakalara 750m/s hızda çarptırılan 0,3 kalibre parçacık benzetimli mermi, 5 katmana sahip plaka içerisine toplamda 16,4mm, 10 katmana sahip plaka içerisine toplamda 14,7mm, 15 katmana sahip plaka içerisine toplamda 14,4mm ve 20 katmana sahip



plaka içerisine toplamda 14,3mm nüfuz edebilmiştir. Bu hız değeri için merminin, 5 katmana sahip fonksiyonel kademelendirilmiş plaka içerisine toplam nüfuziyeti ile 20 katmana plaka içerisine olan nüfuziyeti kıyaslanacak olursa aradaki fark toplamda 2,1mm olmuştur. Yukarıda bahsi geçen nüfuziyet değerleri merminin, plaka üst yüzeyine olan mutlak mesafesidir. Öyle ki 750m/s hızla sahip mermi, kalınlığı 15 mm olan 5 katmanlı plaka içerisine 16,4mm nüfuz etmesine karşın tam delinme gerçekleşmemiştir, çünkü plaka arka yüzeyinde çarpma etkisi ile 2,49mm şişme meydana geldiğinden dolayı, plaka arka yüzeyinin, çarpma öncesi plaka ön yüzeyi arasındaki toplam mesafesi 17,49mm olmuştur.

Grafiklerde, plaka kalınlığı boyunca değişen katman sayısının balistik performans üzerindeki etkisinin mermi hızı ile ilişkisi incelenecek olursa; her iki mermi hızında 10, 15 ve 20 katmana sahip fonksiyonel kademelendirilmiş plakalardaki mermi nüfuziyetinin neredeyse aynı olduğu görülmektedir. 5 katmana sahip plakalardaki mermi nüfuziyeti diğer plakalara kıyasla çok az miktarda daha fazla olmakla birlikte mermi hızının artması ile söz konusu bu farkın da belirgin olmayan bir oranda arttığı görülmektedir.

Şekil 8 ve Şekil 9'da sırasıyla 500m/s ve 750m/s hızlarında, 0,3 kalibre parçacık benzetimli mermi tesiri altında, 4 farklı katman sayısına sahip fonksiyonel kademelendirilmiş plakalarda çarpması sonrasında oluşan deformasyon kesit görüntüleri verilmiştir. Görüntüler incelendiğinde 500m/s hızla sahip merminin (Şekil 8), plakalar içerisinde yaklaşık olarak 8mm ilerleyebildiği görülmekte olup çarpma etkisi ile plaka arka yüzeylerindeki şişme miktarları da yaklaşık olarak 0,45mm'dir. Ayrıca grafikler açık bir şekilde göstermiştir ki 0,1, 0,5 ve 1ms zaman değerleri için plaka ve mermilerde oluşan deformasyon hızları neredeyse birbirlerinin aynıdır. 750m/s hızına sahip mermi (Şekil 9) ise plakalar içerisinde yaklaşık olarak 14,5mm ilerleyebilmiş ve plaka içerisinde kalmıştır. 10, 15 ve 20 katmana sahip plakaların arka yüzeylerinde meydana gelen şişme miktarları yaklaşık olarak 1,75mm seviyelerinde iken 5 katmana sahip plaka arka yüzeyinde oluşan şişme miktarı yaklaşık olarak 2,49 mm olmuştur. Bu mermi hızı için, plaka kalınlığı boyunca artan katman sayısının mermi penetrasyon derinliği ve plaka arka yüzeylerinde oluşan şişme miktarları üzerinde belirgin bir etkisinin olmadığı ve aynı zamanda 0,3 kalibre parçacık benzetimli mermi deformasyonlarının da çok benzer olduğu görülmüştür.

Aydın ve arkadaşları [17] tarafından rapor edilmiş olan deneysel çalışma, bu makalede elde edilen sayısal analiz sonuçlarının doğrulanmasını mümkün kılmaktadır. Aydın ve arkadaşları söz konusu çalışmalarında, kalınlık boyunca farklı sayıda katmana (5, 10, 15 ve 20 katman) sahip fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plakaların balistik performanslarını deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışmalarında toz istifleme-sıcak presleme yöntemini kullanarak ürettikleri Al/SiC fonksiyonel kademelendirilmiş sandviç plakalara, tek kademeli gaz silah sistemi ile 0,3 kalibre parçacık benzetimli mermi

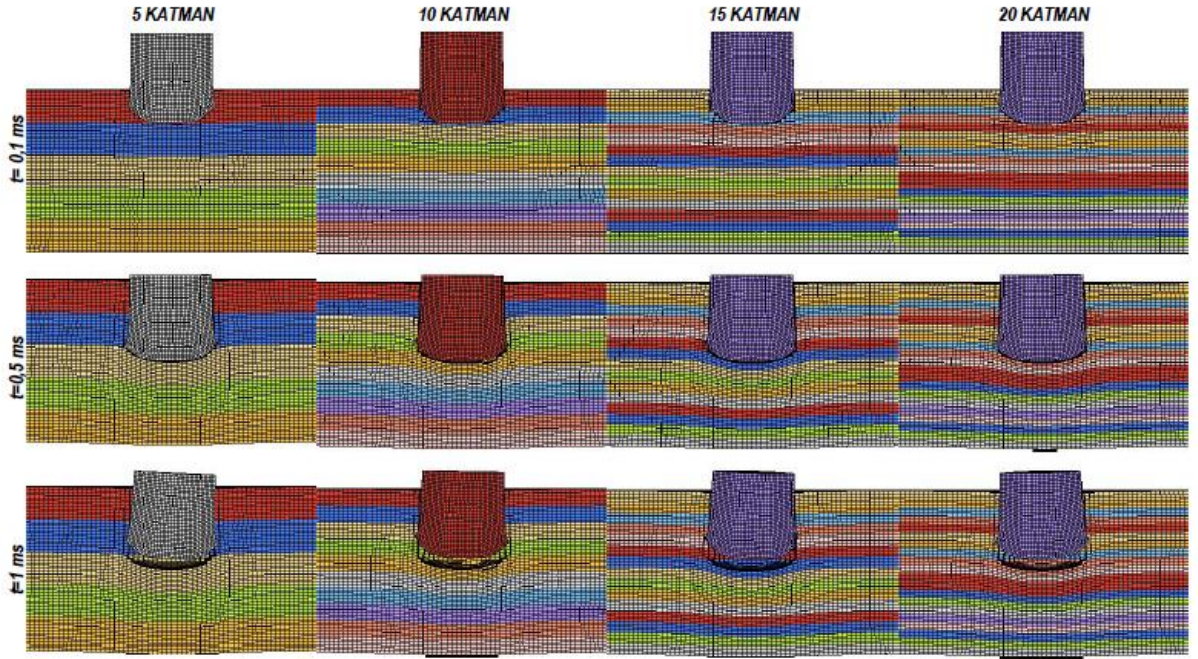
kullanarak yaklaşık 710±5 m/s hızda atış gerçekleştirmişlerdir. Balistik test sonrasında plakaların hasar ve deformasyon mekanizmalarını inceleyen Aydın ve arkadaşları plaka kalınlığı boyunca artan katman sayısının balistik performans üzerinde önemli bir etkisinin olmadığını ortaya koymuşlardır. Bu çalışmada da aynı şekilde plaka kalınlığı boyunca 5, 10, 15 ve 20 katmana sahip fonksiyonel kademelendirilmiş plakaların yine 0,3 kalibre parçacık benzetimli mermi isabeti altında sonlu elemanlar modeli oluşturularak sayısal analizleri yapılmış ve benzer sonuçlara ulaşılmıştır.

#### 4. SONUÇLAR (CONCLUSION)

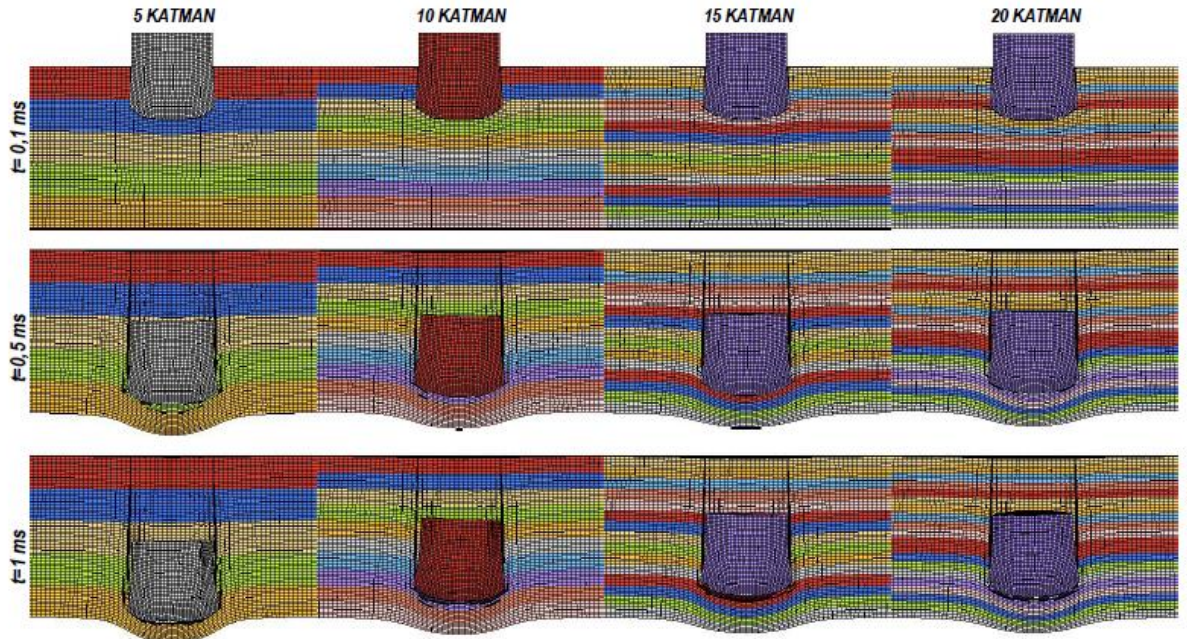
Bu çalışmada fonksiyonel kademelendirilmiş plakalarda kalınlık boyunca bileşenlerin hacimsel değişim sürekliliğinin, balistik performans üzerindeki etkisi sayısal olarak incelenmiştir. Bu kapsamda, kalınlığı boyunca farklı katman sayılarına (5, 10, 15 ve 20 katman) sahip Al/SiC fonksiyonel kademelendirilmiş plakaların balistik çarpma yükü altındaki davranışları, LS-DYNA sonlu elemanlar yazılımı kullanılarak analiz edilmiştir. Lineer olmayan davranışa neden olan geometri, malzeme ve temas sonrasındaki etkileşimin karakterleri dikkate alınarak gerçekleştirilen analizlerde, 0,3 kalibre parçacık benzetimli mermi, seramik zengin yüzey, çarpma yüzeyi olacak şekilde konumlandırılan 4 farklı plaka üzerine çarpıtılmıştır. Analizler 500 ve 750m/s olmak üzere iki farklı mermi hızı için raporlanmış olup 300 ile 850 m/s aralığında değişken mermi hızlarında da benzer sonuçlar elde edilmiştir.

90mm çap ve 15mm kalınlığa sahip plakalarda, seramik (SiC) ve metal (Al) katmanlar arasında kalan, fonksiyonel kademelendirilmiş bölgenin mekanik özellikleri, plaka kalınlığı boyunca sürekli olarak bileşenlerin hacimsel oranlarındaki değişime bağlı olarak bir kuvvet kanununa göre değiştiği varsayılmıştır. Analizlerde iki farklı bileşene sahip yapılarda bileşenlerin, tek eksenli gerilme-şekil değiştirme değerlerini kullanarak nihai malzemenin gerilme şekil değiştirme eğrisinin oluşturulması için geliştirilmiş olan TTO model kullanılarak elasto-plastik davranışlar modellenmiştir.

Analiz sonuçları göstermiştir ki, kademelendirilmiş bölge boyunca katman sayısının artması mermi penetrasyon derinliği üzerinde önemli bir rol oynamamıştır. Katman sayısının artması ile mermi penetrasyonu ve plaka arka yüzeylerinde oluşan şişme miktarları ihmal edilebilir bir oranda azalmıştır. Sonuç olarak bu çalışma, fonksiyonel kademelendirilmiş malzemeler için belirli bir pozisyonda değişen malzeme koİmpozisyonunun kademeli ya da sürekli olarak değişmesinin, her ne kadar termal yüklemeler açısından önemli olsa da, balistik performans açısından önemli olmadığını açıkça ortaya koymuştur, bu sonuç fonksiyonel kademelendirilmiş plakaların daha fazla katman sayısı ile üretilmesinin plaka dayanımına ilave bir katkı sağlamayacağı şeklinde yorumlanabilir.



**Şekil 8.** 0,3 kalibre parçacık benzetimli mermi ( $V=500\text{m/s}$ ) çarpması sonrasında, farklı katman sayısına sahip fonksiyonel kademelenendirilmiş dairesel plakalarda oluşan deformasyon kesit görüntüleri (Deformations on the cross-section of the impact region of functionally graded plates have different layer number caused by 0.3 caliber fragment simulating projectile ( $V=500\text{m/s}$ ))



**Şekil 9.** 0,3 kalibre parçacık benzetimli mermi ( $V=750\text{m/s}$ ) çarpması sonrasında, farklı katman sayısına sahip fonksiyonel kademelenendirilmiş dairesel plakalarda oluşan deformasyon kesit görüntüleri (Deformations on the cross-section of the impact region of functionally graded plates have different layer number caused by 0.3 caliber fragment simulating projectile ( $V=750\text{m/s}$ ))

**KAYNAKLAR (REFERENCES)**

- [1] R. M. Mahamood, E. T. Akinlabi, "Functionally Graded Material", Springer, Switzerland, (2017).
- [2] Mori, T. and Tanaka, K., 1973. "Average stress in matrix and average elastic energy of materials with misfitting inclusions", **Acta Metallurgica**, 21(5): 571–574, (1973).
- [3] Benveniste, Y., "A new approach to the application of Mori-Tanaka's theory in composite materials", **Mechanics of Materials**, 6(2): 147 – 157, (1987).
- [4] Tamura, I., Tomota, Y., and 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**, 1: 611–615, (1973).
- [5] Gunes R, Aydin M, Apalak MK, et al. "Experimental and numerical investigations of low velocity impact on functionally graded circular plates", **Composites Part B: Engineering**, 59: 21-32, (2014).
- [6] Kieback, B., Neubrand, A., and Riedel, H., "Processing techniques for functionally graded materials", **Materials Science and Engineering: A**, 362(1–2): 81–106, (2003).
- [7] Zhou, M., Xi, J., and Yan, J., "Modeling and processing of functionally graded materials for rapid prototyping", **Journal of Materials Processing Technology**, 146(3), 396 – 402, (2004).
- [8] El-Desouky, A., Kassegne, S.K., Moon, K.S., McKittrick, J., and Morsi, K., "Rapid processing; characterization of micro-scale functionally graded porous materials", **Journal of Materials Processing Technology**, 213(8): 1251–1257, (2013).
- [9] Shabana, Y.M. ve Noda, N. "Thermo-elasto-plastic Stresses in Functionally Graded Materials Subjected to Thermal Loading Taking Residual Stresses of the Fabrication Process into Consideration", **Composites Part B: Engineering**, 32: 111-121, (2001).
- [10] Shaw, L.L., "Thermal Residual Stresses in Plates and Coatings Composed of Multi-Layered and Functionally Graded Materials", **Composites Part B: Engineering**, 29: 199-210, (1998).
- [11] Nemat-Alla, M., "Reduction of Thermal Stresses by Developing Two-dimensional Functionally Graded Materials", **Int. Jour. of Solids and Structures**, 40: 7339-7356, (2003).
- [12] Caroline, S. L., Sung-Hoon. A., Lutgard, C. D., Gareth, T., "Effect of functionally graded material (FGM) layers on the residual stress of polytypoidally joined Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>", **Materials Science and Engineering A**, 434: 160-165, (2006).
- [13] **NATO STANAG 2920**, "Ballistic test method for personal armour materials and combat clothing", (2003).
- [14] **MIL-DTL-46593 B (MR) w/AMENDMENT 1**, Projectile, calibers .22, .30, .50, and 20 mm fragment-simulating, (2008).
- [15] Gonçalves, D., de Melo, F., Klein, A., and Al-Qureshi, H., "Analysis and investigation of ballistic impact on ceramic/metal composite armour", **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, 44(2–3): 307–316, (2004).
- [16] Liu, D., Raju, B.B., and Dang, X., "Impact perforation resistance of laminated and assembled composite plates", **International Journal of Impact Engineering**, 24(6–7): 733–746, (2000).
- [17] M. Aydin., M. K. Apalak., Z. G. Apalak., "Effect of Number of Layers on the Ballistics Performance of Functionally Graded Sandwich Plates", **14th International Symposium on Functionally Graded Materials**, Bayreuth-Germany, 215-218, (2016).