



ZIRH UYGULAMALARI İÇİN ALÜMİNA VE SİLİSYUM KARBÜR SERAMİKLERİN BALİSTİK PERFORMANSLARININ SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİYLE İNCELENMESİ

Mustafa Yegin

Analiz Mühendisi

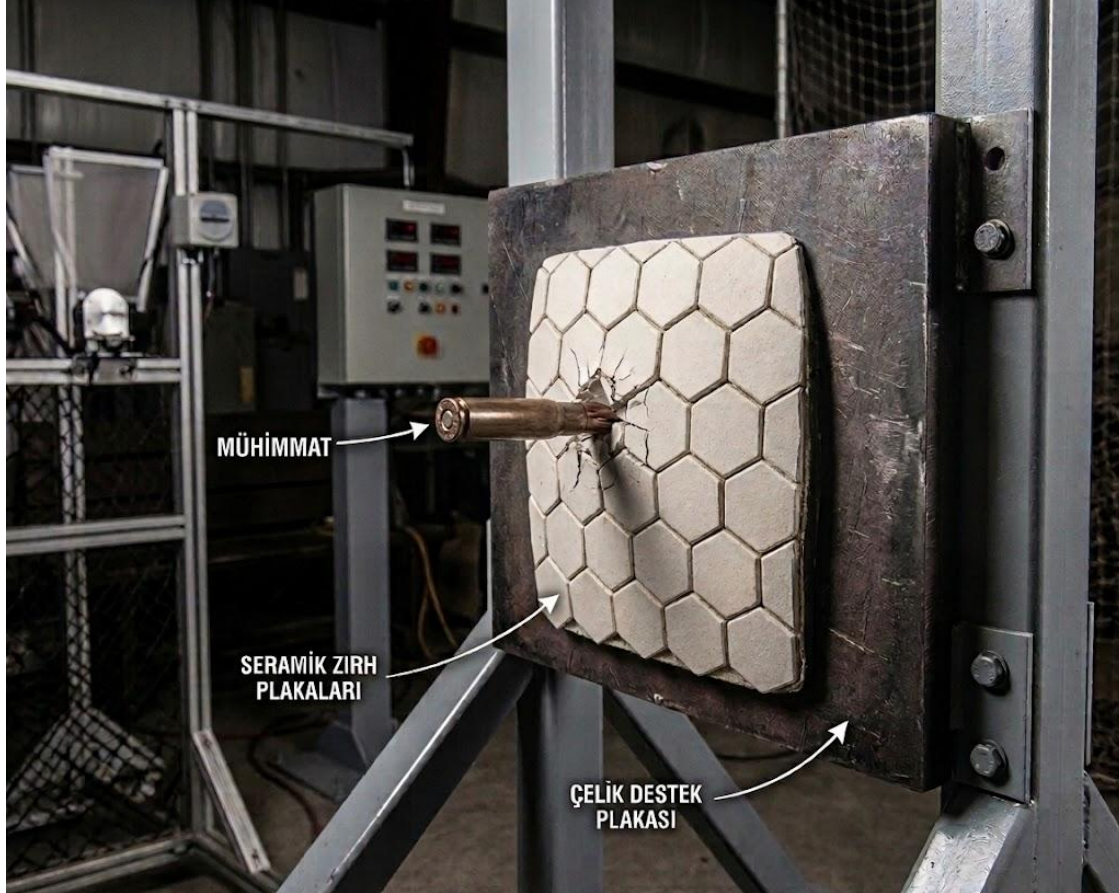
M. Emin Akca

Kıdemli Analiz Müh.

Eylül 2026, Ankara

- ❑ Giriş
- ❑ Sayısal Modelleme (LS-DYNA)
 - ❑ Metodoloji
 - ❑ Genel Model Tanımı
 - ❑ Malzeme Modelleri
 - ❑ Sonuçlar ve Karşılaştırma
- ❑ Bonus: Solid to SPH Metod

Görsel yapay zeka ile oluşturulmuştur!



Kritik Tehdit Sınıfı

STANAG 4569 Seviye 2, 7.62 × 39mm, 715 m/s

Hedef Konfigürasyonu

Alümina/SiC Seramik + ARMOX 500T Çelik Destek

Analiz Yöntemi

LS-DYNA, LAG ve Solid-to-SPH

Hafif zırhlı araçlar ve personel korumada ağırlık avantajı sağlamak için seramik koruma yapıları vazgeçilmezdir.

Referans Çalışma → Model Kurulumu → Malzeme Sinanması



Article

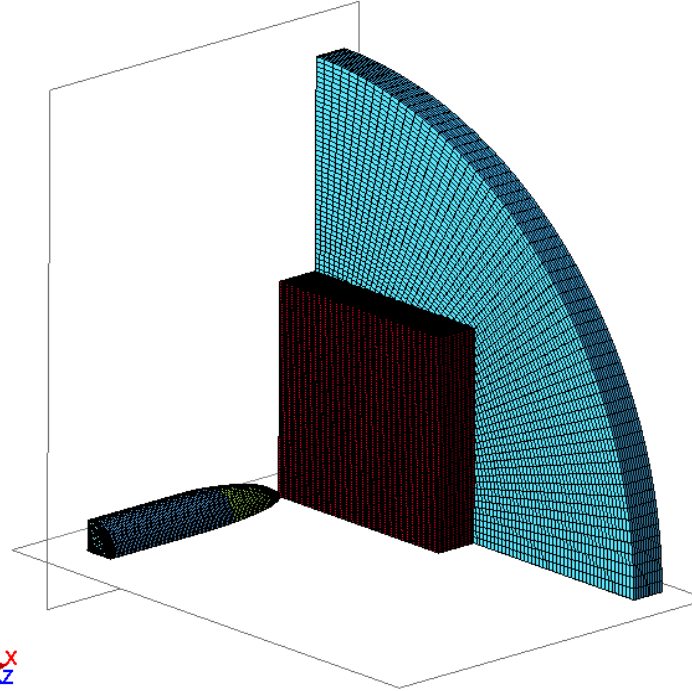
Comparison of Numerical Simulation Techniques of Ballistic Ceramics under Projectile Impact Conditions

Paweł Zochowski ¹, Marcin Bajkowski ², Roman Grygoruk ², Mariusz Magier ^{2,*}, Wojciech Burian ³, Dariusz Pyka ⁴, Mirosław Bocian ⁴ and Krzysztof Jamrozak ^{4,*}

- ¹ Military Institute of Armament Technology, Prym. S. Wyszyńskiego 7, 05-220 Zielonka, Poland; zochowski@wita.mil.pl
- ² Institute of Mechanics and Printing, Faculty of Mechanical and Industrial Engineering, Warsaw University of Technology, Narbutta 85, 02-524 Warsaw, Poland; marcin.bajkowski@pw.edu.pl (M.B.); roman.grygoruk@pw.edu.pl (R.G.)
- ³ Łukasiewicz Research Network—Institute of Non-Ferrous Metals, Sowinskiego 5, 44-100 Gliwice, Poland; wojciech.burian@imn.gliwice.pl
- ⁴ Department of Mechanics, Materials Science and Engineering, Faculty of Mechanical Engineering, Wrocław University of Science and Technology, Smoluchowskiego 25, 50-370 Wrocław, Poland; dariusz.pyka@pwr.edu.pl (D.P.); miroslaw.bocian@pwr.edu.pl (M.B.)
- * Correspondence: mariusz.magier@pwr.edu.pl (M.M.); krzysztof.jamrozak@pwr.edu.pl (K.J.); Tel.: +48-22-234-84-83 (M.M.); +48-71-320-27-60 (K.J.)

Abstract: This article presents an analysis of the effectiveness of available numerical techniques in mapping the characteristic behavior of ballistic ceramics under projectile impact conditions. As part of the work, the ballistic tests were performed on the layered ceramic/steel composite armor and tested with the 7.62 × 39 mm, armor-piercing incendiary (API) BZ projectile. The experimental tests were then mapped using computer simulations. In numerical analyses, four different techniques were used to describe cubic ceramic tiles Al₂O₃ placed on the ARMOX 500T steel backing plate, i.e., the Finite Element Method without Erosion (FEM), Finite Element with erosion (FEM + Erosion), Smoothed Particles Hydrodynamics (SPH) and a hybrid method that converts finite elements to SPH particles after exceeding the defined failure criteria (FEM to SPH conversion). The effectiveness of the individual methods was compared in terms of quality (mapping of characteristic phenomena occurring during the penetration process), quantity (bulge height of the backing plate) and time needed to complete the calculations. On the basis of the results of the experiments and numerical simulations, it was noticed that the most accurate reproduction of the phenomenon of ballistic impact of AP projectiles on ceramic/steel composite armor can be obtained by using a hybrid method, incorporating the conversion of finite elements into SPH particles. This method should be used in cases where accuracy of the results is more important than the time required to complete the calculations. In other situations where the purpose of the calculation is not to determine, for example, the exact value of penetration depth but only to observe a certain trend, the FEM method with defined erosion criteria (variant 2), which is more than 10 times faster, can be successfully used.

Keywords: ballistic impact; ceramic armor; numerical simulation; finite element method; smoothed particles hydrodynamics



Parametre	Al ₂ O ₃	SiC
ρ [g/cm ³]	3.84	3.16
G [GPa]	93	183
A [-]	0.93	0.96
B [-]	0.31	0.35
C [-]	0.007	0
m [-]	0.6	1
n [-]	0.64	0.65
EPSI	1	1
T [MPa]	262	370
SFMAX	1	0.8
HEL [MPa]	8000	14570
PHEL [MPa]	1460	5900
Beta	1	1
Hasar parametreleri		
D ₁ [-]	0.01	0.48
D ₂ [-]	0.7	0.48
K ₁ [GPa]	131	204.8
K ₂ [GPa]	0	0
K ₃ [GPa]	0	0
*MAT_ADD_EROSION	VOLEPS = 0.05	VOLEPS = 0.05



Citation: Zochowski, P.; Bajkowski, M.; Grygoruk, R.; Magier, M.; Burian, W.; Pyka, D.; Bocian, M.; Jamrozak, K. Comparison of Numerical Simulation Techniques of Ballistic Ceramics under Projectile Impact Conditions. *Materials* 2022, 15, 18. <https://doi.org/10.3390/ma15010018>

Academic Editors: Claudio Ferone and Cosma Balazs

Received: 2 November 2021

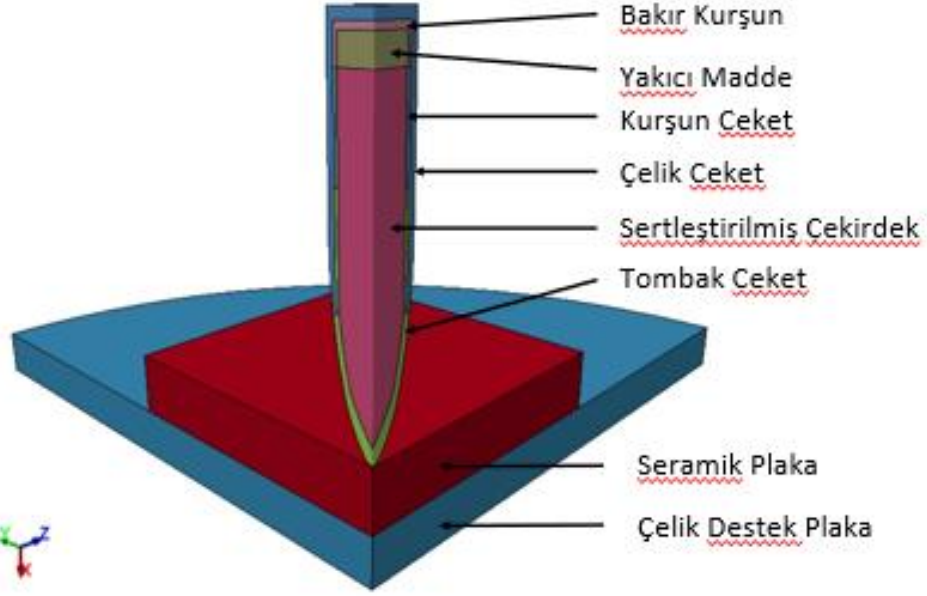
Accepted: 17 December 2021

Published: 21 December 2021

Publisher's Note: MDPI stays neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

Zochowski et al. (2020)

“Comparison of Numerical Simulation Techniques of Ballistic Ceramics under Projectile Impact Conditions”



Model Geometrisi

7.62 x 39mm mühimmat, 50 x 50 x 4 mm seramik plaka ve 500 x 500 x 4 mm ARMOX 500T Çelik destek plakası var.

Mühimmat Hızı

715 m/s

Modelleme Yaklaşımı

$\frac{1}{4}$ Simetri

Destek plakalarının dış kenarlarından sabit sınır koşullarıyla mesnetlendiği kabul edilmiştir.



*MAT_MODIFIED_JOHNSON_COOK



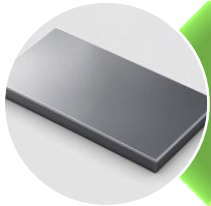
Çelik çekirdek ve metalik bileşenlerin plastik deformasyonu için.



*MAT_JOHNSON_HOLMQUIST_CERAMICS



Alümina (Al_2O_3) ve SiC seramiklerin dinamik hasar ve kırılma davranışı için.

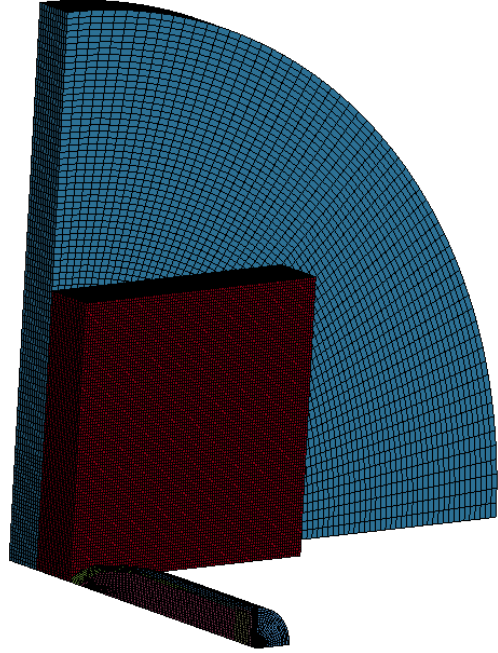


*MAT_MODIFIED_JOHNSON_COOK



ARMOX 500T çelik plakanın yüksek mukavemet ve akma davranışı için.

LS-DYNA'da malzeme hasar ve deformasyon süreçleri; Johnson-Cook ve JH-2 durum denklemleriyle simüle edilmiştir.



Mühimmatın çarpma bölgesinde yoğun mesh → uzak bölgelerde kademeli seyrelme

MODEL İÇERİĞİ

Eulerian ağ (~ 560 Bin)

STANAG seviye 2 için 715 m/s mühimmat başlangıç hızı

TEMAS KARTLARI

***CONTACT_ERODING...**

Malzemelerde fail tanımı olduğu için tüm temaslar eroding opsiyonuyla tanımlanmıştır.

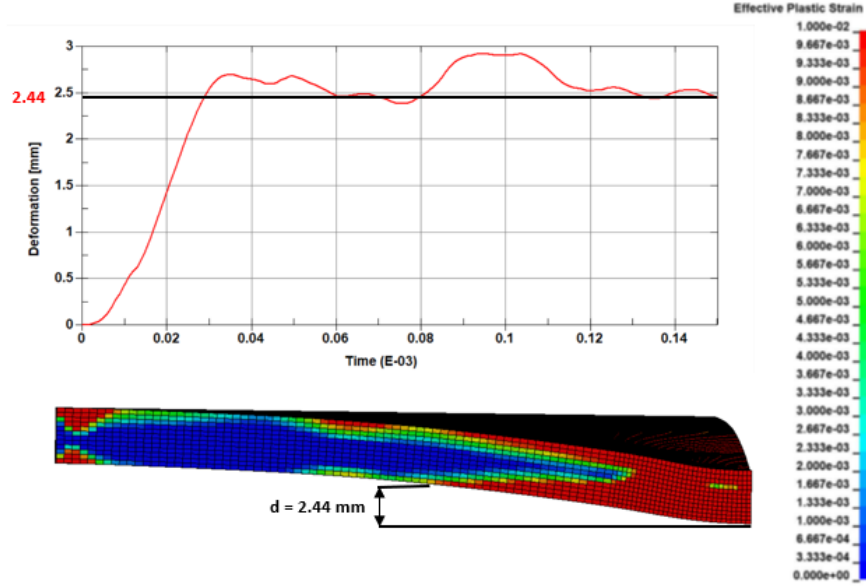
SİMETRİ

$\frac{1}{4}$ model

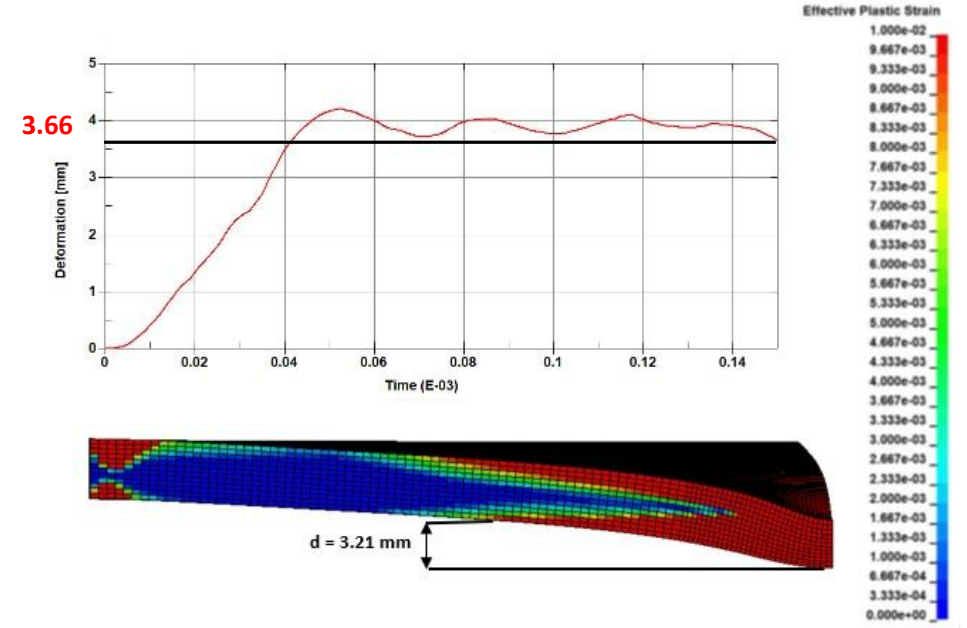
$y = 0, z = 0$ simetri düzlemi

Mühimmat, seramik ve destek plakalarının tümü Lagrangian yöntemle modellenmiştir.

Al_2O_3



SiC



ÇIKARIM: Alumina seramik malzemesi Silisyum Karbür seramik malzemesine göre gösterdiği enerji sönümleme miktarı merminin hızını fazla düşürerek arkasındaki destek plakasının çökme miktarını azaltmaya yardımcı olmaktadır.

Erozyon ve Kütle Kaybı Kontrolü

Standart Lagrange çözümünde hasar kriteriyle silinen elemanların modelden tamamen yok olmasını ve kütle kaybını önlemek amacıyla tercih edilir.

Çalışma Prensibi

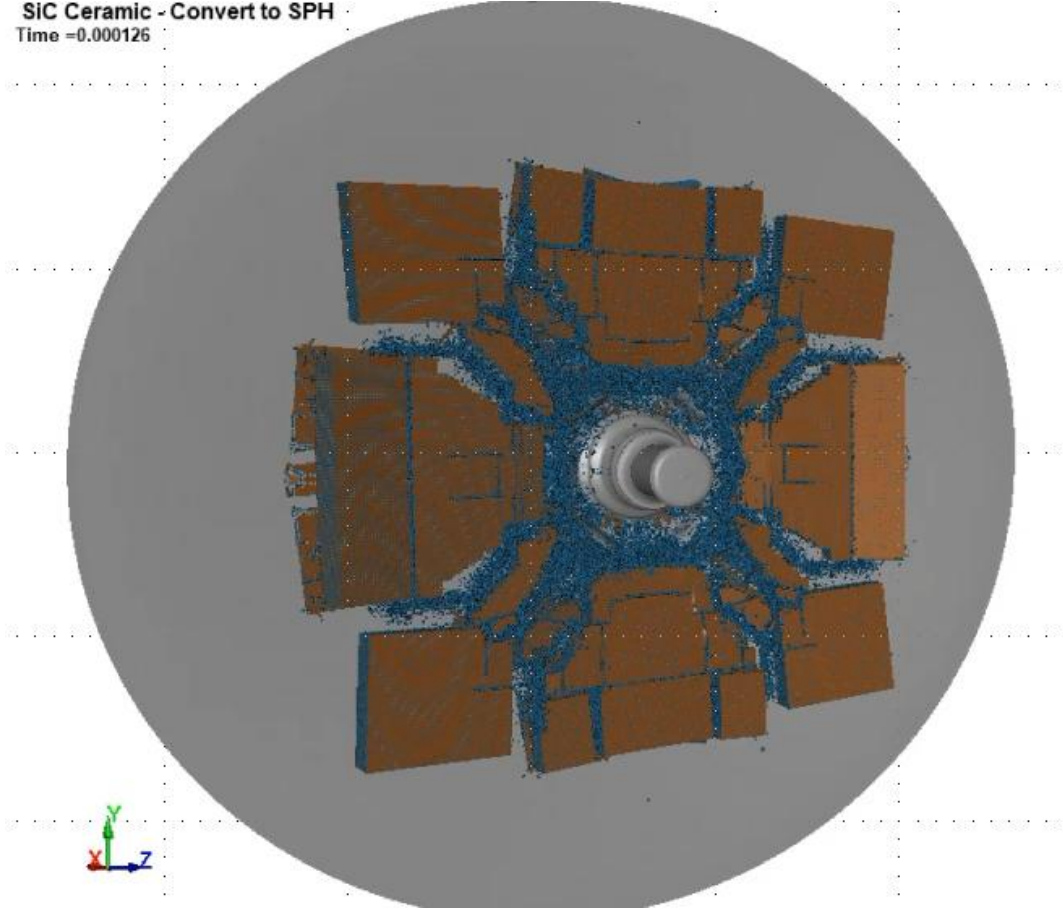
Belirli bir hasar veya gerilme kriterine ulaşan katı **(Lagrange)** elemanlar, anlık olarak SPH parçacıklarına dönüştürülür.

Balistik Analize Katkısı

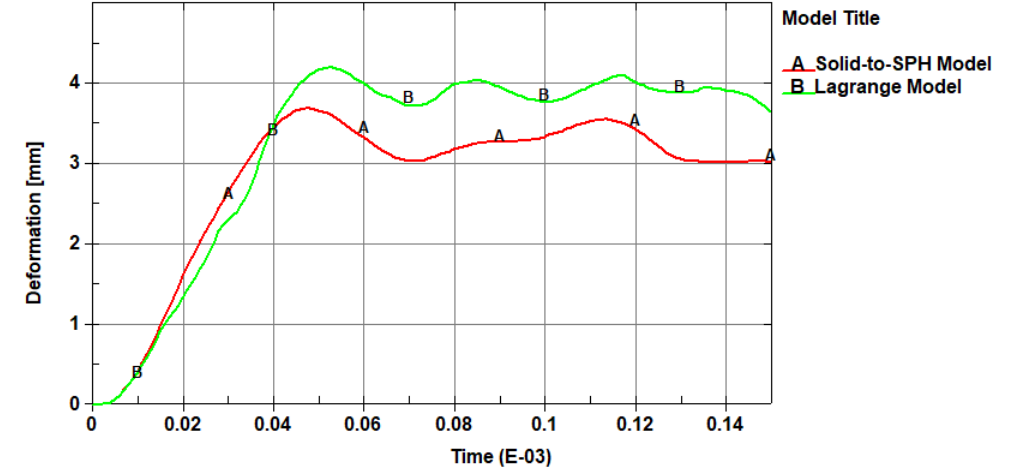
Seramik tozlaşması, malzeme sıçramaları ve merminin plaka içindeki ilerleme davranışı çok daha yüksek doğrulukla simüle edilir.

Hibrit Yaklaşım: Standart FEM yönteminin tıkanıp aşırı hasar bölgelerinde, Solid-to-SPH dönüşümü sayesinde simülasyonun kesintisiz devam etmesi sağlanmıştır.

SiC Ceramic - Convert to SPH
Time = 0.000126



Deplasman Karşılaştırması



Nümerik Model	Çökme Miktarı [mm]	Fark [%]
Lagrange Model	3.66	Referans
Solid-to-SPH Model	3.03	-%17.21

ÇIKARIM: Alumina seramik malzemesi Silisyum Karbür seramik malzemesine göre gösterdiği enerji sönümleme miktarı merminin hızını fazla düşürerek arkasındaki destek plakasının çökme miktarını azaltmaya yardımcı olmaktadır.



TEŞEKKÜRLER