

KONKAV VE DÜZ YÜZEY ŞEKİLLİ SERAMİK ZIRHLARIN BALİSTİK PERFORMANSININ SAYISAL MODELLENMESİ

Mehmet Akif AKDOĞAN

Gazi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü, Ankara.
maakdogan@gazi.edu.tr

Osman Selim TÜRKBAŞ

Gazi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü, Ankara.
turkbas@gazi.edu.tr

ÖZET

Bu çalışmada balistik koruma amacıyla Alümina (Al_2O_3) seramik/Alüminyum katmanlı zırhın yüzeyinin konkav veya düz olmasının korumaya nasıl etki edeceği sayısal olarak modellenerek incelenmiştir. Çalışma NIJ standartları seviye IV baz alınarak, mermi ve zırh modeli uygulamaya uygun olarak modellenmiştir. Modellemede ANSYS Autodyn programı kullanılarak çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Sayısal Modelleme, Darbe Davranışı, Balistik, Seramik Kompozit Zırh,

BALLISTIC PROTECTION PERFORMANCE OF CURVED AND PLAIN CERAMIC ARMORS

ABSTRACT

In this study, the effects of surface shape of ceramic laminated armor made of alumina (Al_2O_3) on the protection level using numerical modelling. Two types of surface shape namely concave and planar are considered. Both bullet and armor are modelled with NIJ Standards level IV. ANSYS Autodyn software is used in the development of models.

Keywords: Numerical Model, Impact Behaviour, Ballistic, Ceramic Composite Armor,

1. GİRİŞ

Günümüzde, geleceğin savunma uygulamalarına yönelik olarak, performans ve hareket kabiliyetinden ödün vermeden, balistik koruma seviyesini arttırmak amacıyla yapılan çalışmalar giderek artmakta ve yeni yaklaşımlar geliştirilmektedir. Yeni malzeme ve üretim yöntemleriyle tahrip gücü artan mermilere karşı yeni zırh sistemleri geliştirilmektedir. Askeri personelin taşıdığı koruyucu yelek, başlık gibi ekipmanlarda ve havacılık uygulamalarında, hafif ve mukavemeti yüksek malzemeler üretmek amacıyla birçok çalışma yapılmaktadır.

Amerikan askeri standartları arasında MIL-A-12560H ve MIL-A-46100D'ye göre homojen haddelenmiş zırh çeliklerinin birim alandaki kütle etkinlik değeri Bir olarak kabul edilmektedir. Buna göre, alüminyum, kompozit ve seramik malzemelerden üretilen zırhların kütle etkinlik değerlerinin daha yüksek olduğu bilinmektedir. [1].

Etkin zırh sistemlerinde, düşük yoğunluk, yüksek katılık ve yüksek sertlikleri nedeniyle seramik malzemeler tercih edilmektedir [2]. Seramiklerin balistik amaçlı kullanımı esnasında arka yüzeylerine, korunması istenen yüzeyde meydana getirebilecek hasarın önlenmesi ve merminin artık kinetik enerjisinin emilmesi için sünek bir plaka daha yerleştirilmelidir. Bu plakanın malzemesi metal olabileceği gibi, fiber takviyeli polimer kompozitler de tercih edilebilmektedir. Kompozit zırh sisteminde en üst katman olarak kullanılan seramik tabaka, merminin aşınmasına ve parçalanmasına neden olmakta; arkadaki plaka ise körlenmiş mermiye karşı reaksiyon göstermekte, kırılan seramik parçalarını tutmakta ve kinetik enerjinin absorbe edilmesini sağlamaktadır.

Mermi seramik önyüzeye çarptığında, merminin yüksek kinetik enerjisi nedeniyle seramik yüzey parçalanmaktadır. Bu hasarlar, çekme hasarı, enine çatlaklar, pulverizasyon ve shear plug olarak meydana gelmektedir. Bu şekilde hazırlanmış kompozit zırh sistemlerinde zırh delinse bile merminin etkisinin önemli oranda azaldığı görülmektedir. [3-7]

Seramik kompozit zırh sistemlerinde yağın olarak kullanılan seramik türleri Alümina (Al_2O_3), Silisyum Karbür (SiC) ve Bor Karbür (B_4C)'dür [8-10].

Tüm seramik malzemeler arasında Alümina (Al_2O_3) daha ucuz olup yüksek sertlik ve kırılma direncine sahiptir.

Celal Evcı ve Müfit Gülgeç'in çalışmalarında belirttiği gibi, merminin penetrasyonu sırasında alümina seramikteki kırılma konisinin büyümesi, plastik deformasyonla birlikte merminin körelmesine ve deformasyona uğramasına sebep olmaktadır. Ve merminin kinetik enerjisinin büyük bir kısmı da absorbe edilmektedir. Ayrıca görülmektedir ki, fiber takviyeli polyeater matrisli kompozit plaka ile desteklenmiş alümina seramik zırh sistemi mükemmel bir balistik koruma sağlamaktadır [11].

Literatürde yer alan bir çok çalışmaya rağmen hâlâ ideal zırh şeklinin nasıl olması gerektiğine dair bir kanıya varılamamıştır. Seramik plakanın kalınlığı ve şekli, destek plakasının malzemesi, kalınlığı ya da kombinasyonu gibi konular üzerine çalışmalar hızla türetilmektedir.

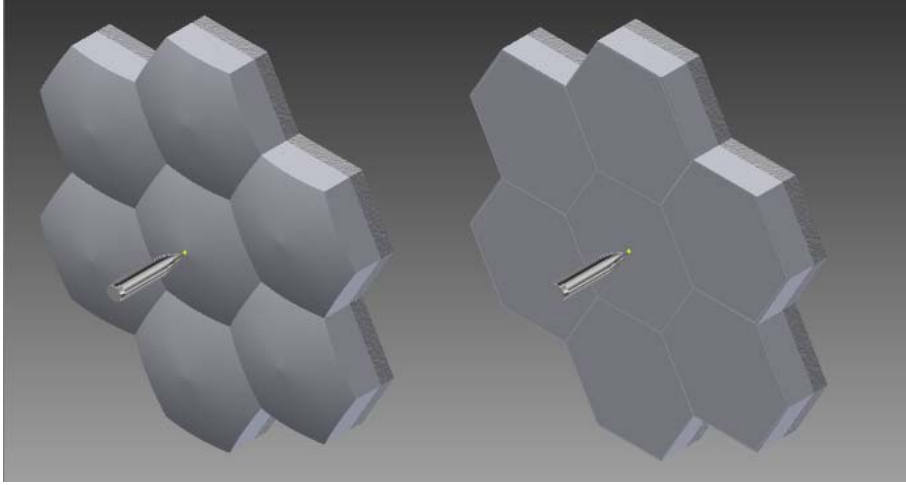
B.K. Fink çalışmasında, altıgen seramik zırh modüllerinin dairesel şekle yakın olması ve maksimum alanı kapatması nedeniyle en verimli seramik şekli olduğundan bahsetmektedir. Altıgen modüllü seramik zırhın üzerinde, üç modülün bir araya geldiği nokta korumanın en zayıf olduğu bölgedir. Bu noktaya gelecek bir mermi hesaba katıldığında zırhın gerekli korumayı sağlaması gerekmektedir. Bu da altıgen zırh parçalarının, dört parçanın bir araya geldiği dörtgen ya da kare zırh modüllerine göre farklı bir üstünlüğü olduğu ifade edilmektedir [12].

Ayrıca S.N. Monteiro ve diğerlerinin yaptığı çalışmada, aynı kalınlıktaki alümina seramik zırhın çarpışma yüzeyinin düz ve konkav olmasının balistik performansa etkisi incelenmiştir. Elde edilen sonuçlarda ön yüzü konkav olan seramiğin daha fazla enerji absorbe ederek daha etkili bir koruma sağladığı görülmüştür [13].

2. SAYISAL MODELLEME

Yüzeyi kavisli ve düz olan altıgen alümina zırh sisteminin modellenmesi; balistik çarpışma, delme ve patlama problemleri gibi kısa süreli lineer olmayan dinamik olaylar için yaygın bir şekilde kullanılan ANSYS/Autodyn programında 3 boyutlu olarak gerçekleştirilmiştir [14]. Şekil 1'de ANSYS Autodyn programında

sonlu elemanlar modeli oluşturulmak üzere CAD programında çizilmiş yüzeyi konkav ve düz olarak iki farklı yapıda seramik zırh modeli görülmektedir.



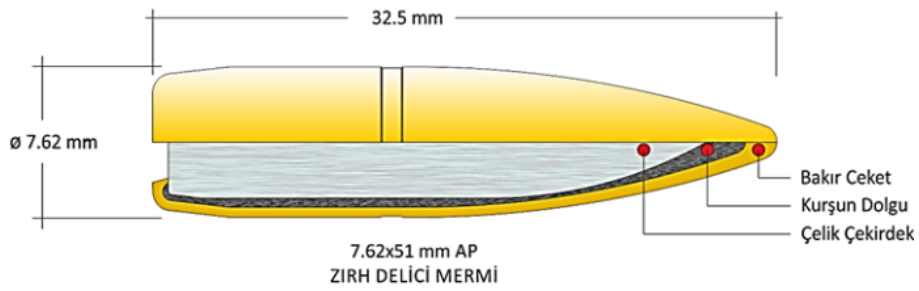
Şekil 1. Yüzeyi konkav ve düz altıgen modüler zırh sistemi

Her iki geometri için de 15mm kalınlığında Alümina (Al_2O_3) ön plaka, 8 mm kalınlığında Alüminyum arka plaka için inceleme yapılmıştır.

Balistik darbe özellikleri incelenecek olan seramik önyüzlü kompozit malzemelerin testlerinde NATO'nun esas aldığı Amerikan NIJ standartları kullanılmaktadır. Bu standartların 3. Seviyesine göre NATO 7,62 mm FMJ (Full Metal Jacket) yani bakır ceket kaplı kurşun çekirdek mermi, 4. Seviyesine göre de 7,62 mm M2 AP (Armor Piercing) yani zırh delici mermi kullanılmaktadır. Yine Balistik korumaya yönelik olarak NATO standartları arasında yer alan STANAG 4569 bünyesinde lojistik ve zırhlı araçlar için geliştirilen balistik koruma seviyeleri belirlenmiştir. Kompozit malzemeler için bu seviyelerden birincisi, seramik önyüzlü kompozit zırh sistemi için üçüncüsü esas alınmaktadır. 1. Seviyeye göre 7,62 mm NATO FMJ mermi, 3. Seviye için 7,62 mm AP mermi tanımlanmaktadır [15-16]. Bu yüzden mermi modeli 7.62 mm zırh delici (AP) merminin çelik çekirdeği baz alınarak geliştirilmiştir.

2.1. Mermi Modeli

Analizlerde Makine Kimya Endüstrisi Kurumu üretimi olan 7.62mm x51 AP zırh delici mermi modellenmiştir (Şekil 2). Zırh delici merminin çekirdeği çelik, dolgusu kurşun ve ceketini bakır malzemeden üretilmektedir. Bu malzemelerin yapısal detayları üreticiye göre değişmektedir.



Şekil 2. 7.62mm x51 AP zırh delici mermi şematığı

Merminin ortasında 28 mm uzunluğunda 5,82 mm çapında 22 mm yarıçapında 609,19 mm³ hacme sahip ucu sivri bir çelik çekirdek bulunmaktadır.

Yapılan bir çok analizde merminin en dışında bulunan bakır ceketin ve çekirdekle arasındaki kurşun dolgunun sonuçlarda ihmal edilebilir bir fark yaratmasına rağmen, zaman adımlarını oldukça küçülttüğü ve analiz süresini bir hayli uzattığı görülmüştür. Bu nedenle sonraki çalışmalarda merminin yalnızca çelik çekirdeği modellenerek analizler gerçekleştirilmiştir. Kullanılan malzeme ANSYS Autodyn Malzeme kütüphanesinden 1006 çeliği seçilmiştir. Bu malzeme özellikleri Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Çelik Çekirdeğin Malzeme Özellikleri [14]

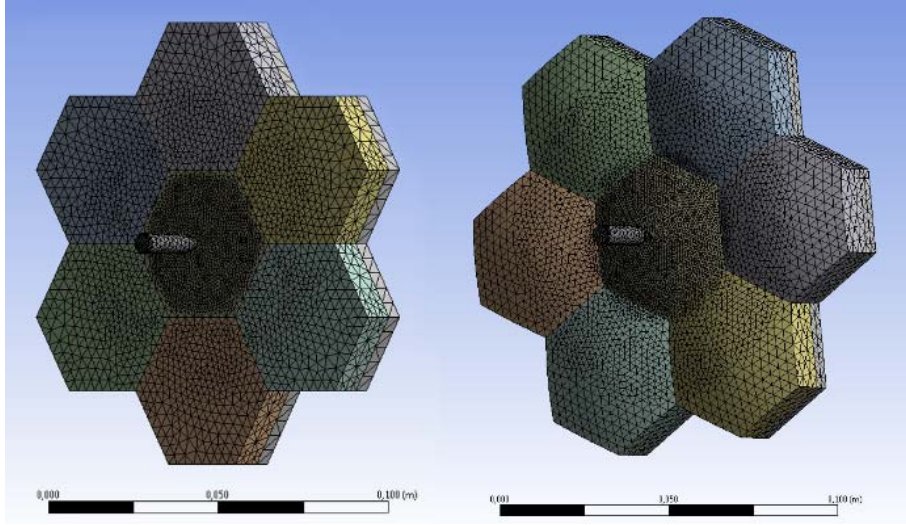
Name:	STEEL 1006
Referance Density :	7.896 (g/cm³)
EOS	Shock
Gruneisen Coefficient :	2.170
Parameter C1 :	4.569 e+3 (m/s)
Parameter S1 :	1.490
Parameter Quadratic S2 :	0.000 (s/m)
Relative Volume, VE/V0	0.000
Relative Volume, VB/V0	0.000
Parameter C2 :	0.000 (m/s)
Parameter S2 :	0.000
Referance Temperature :	300.000 (K)
Specific Heat :	452.000 (J/kgK)
Thermal Conductivity :	0.000 (J/mKs)
STRENGTH	Johnson Cook
Shear Modulus	8.180 e+7 (kPa)
Yield Stress	3.500 e+5 (kPa)
Hardening Constant	2.750 e+5 (kPa)
Hardening Exponent	0.360
Strain Rate Constant	0.022
Thermal Softening Exponent	1.000
Melting Temperature	1.811 e+3 (K)
Ref. Strain Rate (/s)	1.000
Strain Rate Correction	1st Order

Johnson Cook modeli, genellikle yüksek gerinme oranlarına, büyük gerilmelere ve yüksek sıcaklıklara maruz malzemelerin, özellikle de metallerin mukavemet davranışları için kullanılan bir modeldir.

2.2. Zırh Modeli

Analizlerde kenar uzunluğu 50 mm, kalınlığı 15 mm olan altıgen modüller halinde Alümina seramik ön plakalar, 8 mm kalınlığında ön plakanın arkasını tamamen kaplayacak geometride tek parça alüminyum arka plaka modellenmiştir. Seramik modelin mesh'ten bağımsızlık analizlerinden sonra çarpışma merkezinde 0,5 mm boyutundan en dışta 2 mm boyutuna kadar mesh dağılımı uygulanarak analizler gerçekleştirilmiştir (Şekil 3).

Literatürde yapılan araştırmalar sonunda %99,5 saflığın üzerindeki Alümina seramikler için malzeme modellerinin hemen hemen aynı olduğu görülmektedir. Bu nedenle analizlerde %99,7 saflıktaki Alümina Seramik malzeme modeli Autodyn kütüphanesinden seçilmiştir. Malzeme modeline ait değerler Tablo 2'de verilmiştir.



Şekil 3. Seramik zırh modellerinin mesh dağılımı

Tablo 2. Alümina Seramiğin Malzeme Özellikleri [14]

Name:	AL203-99.7
Referance Density :	3.80 (g/cm3)
EOS	Polynomial
Bulk Modulus A1 :	2.000 e+8 (kPa)
Parameter A2 :	0.000 (kPa)
Parameter A3 :	0.000 (kPa)
Parameter B0 :	0.000
Parameter B1 :	0.000
Parameter T1 :	2.00 e+8 (kPa)
Parameter T2 :	0.000 (kPa)
Referance Temperature :	0.000 (K)
Specific Heat :	0.000 (J/kgK)
Thermal Conductivity :	0.000 (J/mKs)
STRENGTH	Johnson-Holmquist
Shear Modulus :	1.35 e+8 (kPa)
Model Type :	Continuous (JH2)
Hugoniot Elastic Limit :	-5.90 e+6 (kPa)
Intact Strength Constant A :	0.989
Intact Strength Exponent N :	0.3755
Strain Rate Constant :	0.000
Fractured Strength Const. B :	0.770
Fractured Strength Expo. M :	1.000
Max. Fracture Strenth Ratio :	0.500
FAILURE	Johnson-Holmquist
Hydro Tensile Limit :	-2.90 e+4 (kPa)
Model Type :	Continuous (JH2)
Damage Constant, D1 :	0.010

Damage Constant, D2 :	1.000
Bulking Constant, Beta :	1.000
Damage Type :	Gradual (JH2)
Tensile Failure :	Hydro (Pmin)

Johnson-Holmquist modeli, cam ve seramikler gibi yüksek basınçlara, kesme gerinimlerine ve yüksek gerinim hızlarına maruz kırılğan malzemelerin modellenmesinde kullanılmaktadır [17].

2.3. Malzeme Modeli

Bu çalışmada asıl inceleme konusu olan zırh ön katmanı Alümina (Al_2O_3) seramik, Polinom Hal Denklemleri (EOS), Johnson-Holmquist dayanım ve hasar modelleri (JH-2) kullanılarak modellenmiştir [18]. Ortotropik malzeme için lineer artan elastik bünye denklemleri kısaltılmış olarak şu şekilde ifade edilebilir:

$$\begin{bmatrix} \Delta\sigma_{11} \\ \Delta\sigma_{22} \\ \Delta\sigma_{33} \\ \Delta\sigma_{23} \\ \Delta\sigma_{31} \\ \Delta\sigma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\varepsilon_{11} \\ \Delta\varepsilon_{22} \\ \Delta\varepsilon_{33} \\ \Delta\varepsilon_{23} \\ \Delta\varepsilon_{31} \\ \Delta\varepsilon_{12} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Burada gerinim adımlarını ortalama ($\Delta\varepsilon_{ave}$) ve sapma ($\Delta\varepsilon_{ij}^d$) bileşenlerine ayrılabilir [19].

$$\Delta\varepsilon_{ij} = \Delta\varepsilon_{ij}^d + \Delta\varepsilon_{ave} \quad (2)$$

Ortalama gerinim adımını, gerinim tensörünün üç işareti olarak yeniden yazıldığında;

$$\Delta\varepsilon_{ave} = \frac{1}{3}(\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33}) \quad (3)$$

Çok küçük olan gerinim adımlarında, hacimsel gerinim artışı ise şu şekilde yazılabilmektedir [19];

$$\Delta\varepsilon_{vol} \approx (\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33}) \quad (4)$$

Bu bilgiler ışığında ortotropik bünle denklemi yeniden yapılandırıldığında aşağıdaki formu alır [19].

$$\begin{bmatrix} \Delta\sigma_{11} \\ \Delta\sigma_{22} \\ \Delta\sigma_{33} \\ \Delta\sigma_{23} \\ \Delta\sigma_{31} \\ \Delta\sigma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\varepsilon_{11}^d + \frac{1}{3}\Delta\varepsilon_{vol} \\ \Delta\varepsilon_{22}^d + \frac{1}{3}\Delta\varepsilon_{vol} \\ \Delta\varepsilon_{33}^d + \frac{1}{3}\Delta\varepsilon_{vol} \\ \Delta\varepsilon_{23} \\ \Delta\varepsilon_{31} \\ \Delta\varepsilon_{12} \end{bmatrix} \quad (5)$$

Polinom hal denklemi ise aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir:

$$P = A_1\varepsilon_{vol} + A_2(\varepsilon_{vol})^2 + A_3(\varepsilon_{vol})^3 + (B_0 + B_1\varepsilon_{vol})\rho_0^e \quad (6)$$

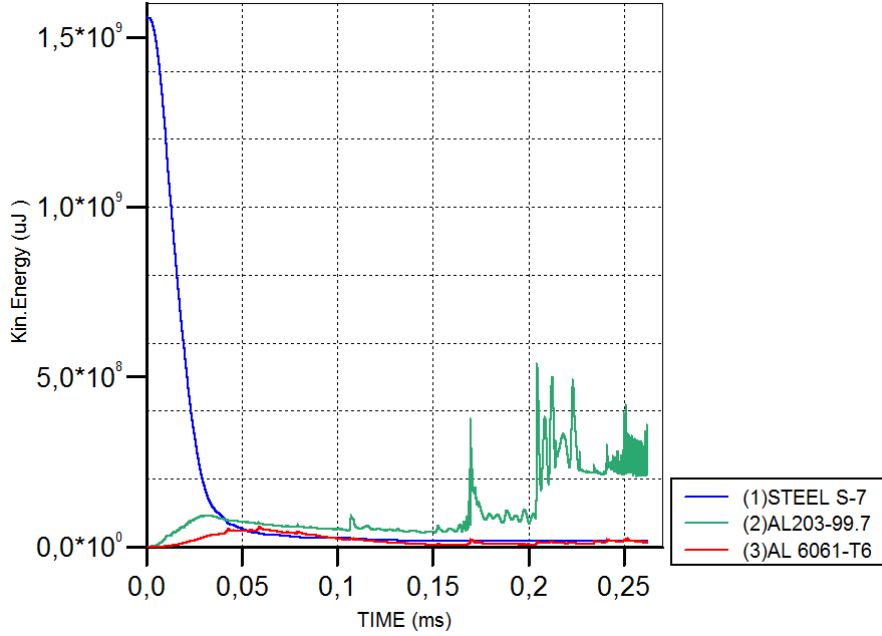
Burada P basıncı, ρ_0 sıfır basınç yoğunluğunu ve e ise özgül iç enerjisi temsil etmektedir. A_1 malzemenin bulk modülü, A_2, A_3, B_0, B_1 Tablo 2'de verilen diğer malzeme sabitleridir [19].

3. ANALİZ

Autodyn programı altında modelleme gerçekleştirilirken başlangıç şartı olarak yalnızca mermi hızı alınmıştır. Hız uluslar arası NIJ ve STANAG standartları içerisinde olmak koşulu ile 835 m/s olarak belirlenmiştir. Çelik mermi çekirdeğine, seramik zırh yüzeyine dik gelecek şekilde 835 m/s'lik başlangıç şartı atanmıştır. Seramik zırhın arkasında bulunan alüminyum plakanın arka yüzeyinin kenarlarında bulunan elemanlar mermi hareket yönünde sabitlenmiştir. Bu sınır şartıyla analiz esnasında mermi zırha çarptığında zırhın kenarlarındaki elemanlar çarpışma doğrultusunda hareket edemeyeceklerdir. Malzemeleri atanan, sınır ve başlangıç şartları verilen analizin son olarak çözüm ve çıktı ayarları yapılmıştır. Kayıt ayarlarında analizin maksimum döngü limiti 100.000, maksimum zaman limiti 0,1 ms, her bir kayıt alma süresini 5e-4 ms olarak alınmış ve analizler bu ayarlar doğrultusunda gerçekleştirilmiştir.

4. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

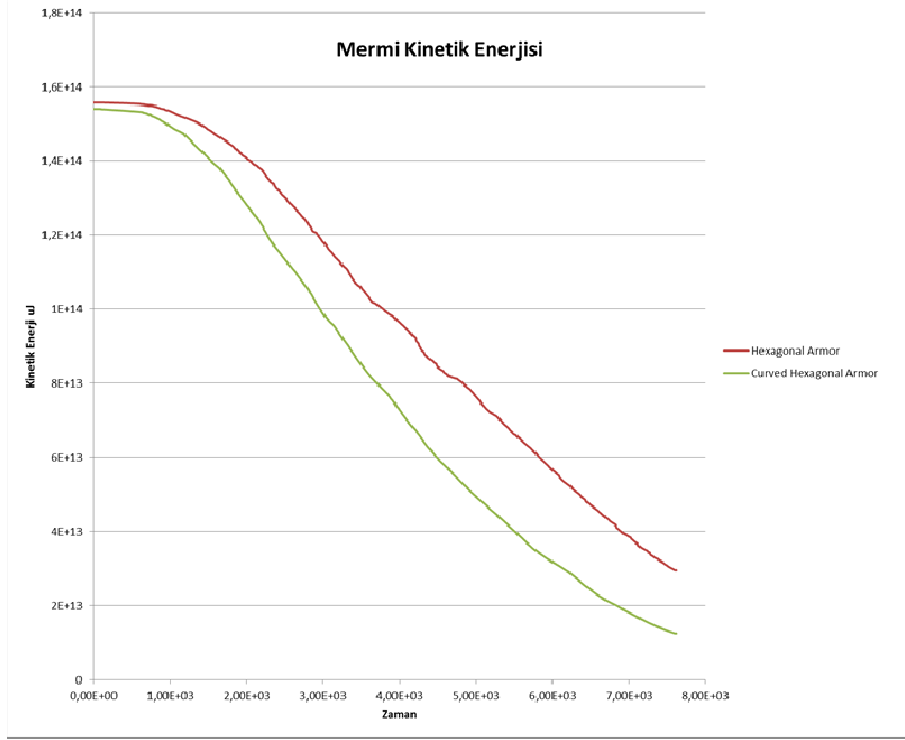
Seramik zırh modellerinde genel olarak merminin kinetik enerjisinin sönümlenmesi ve hasarın oluşumu yaklaşık 25 - 30 μ s lik bir zamanda meydana gelmektedir.



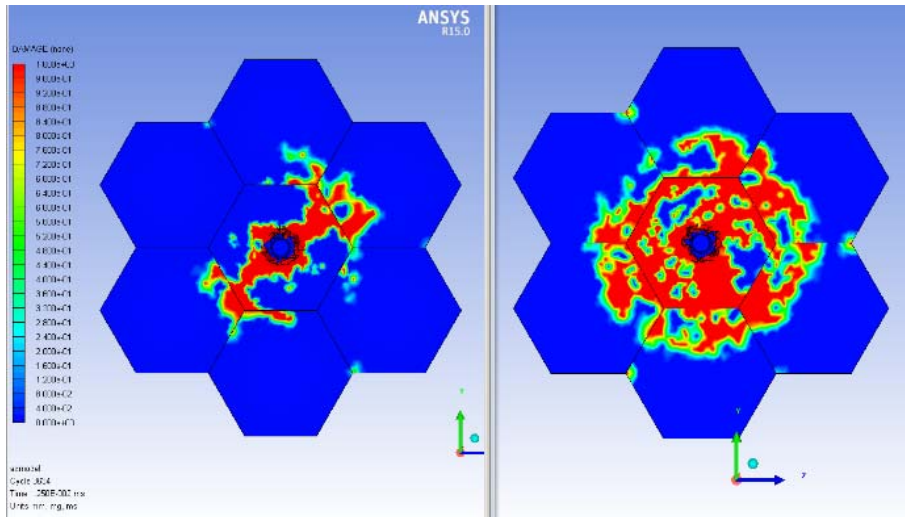
Şekil 4. Malzemeye göre kinetik en. – zaman grafiği

Yapılan çoklu analizler sonucunda genel olarak ilk 5 μ s civarında merminin sivri ucu deforme olmakta, parçalanmakta ya da düzleşmektedir. 10 μ s civarında ise merminin kinetik enerjisinin çoğunluğu emilmiş durumdadır. 10-15 μ s'den sonra seramikte çarpma ile çatlak oluşumu ve kırılmalar giderek artmakta ve kinetik enerjisi yükselmektedir.

Düz ve konkav yüzeyli seramik zırhın aynı zaman dilimlerinde birbirinden biraz daha farklı hasar oluşumlarının olduğu incelenmiştir. Bu iki farklı modelde 12,5 μ s sonra meydana gelen hasar dağılımı Şekil 5'te gösterilmiştir. Ayrıca iki analizdeki mermi modellerinin kinetik enerjilerindeki değişim grafiği Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 6. Düz ve konkav yüzeyli seramik zırh için mermi kinetik enerji grafiği



Şekil 5. Konkav (solda) ve düz (sağda) yüzeyli seramik zırhın 12,5 μ s'deki hasar dağılımı

Şekil ve grafiklerde yapılan incelemelerde konkav yüzeye sahip seramik ön plakalı zırhın aynı şartlar altında düz yüzeyli seramiğe göre merminin kinetik enerjisini daha fazla ve daha kısa sürede absorbe ettiği görülmüştür.

KAYNAKLAR

- [1] Alper İ., Çoruhlu A., "Silah sistemleri ve balistik", Kara Harp Okulu Basımevi, Ankara, 77-95, 150-155, (2005).
- [2] Krell A., Strassburger E., "Hierarchy of key influences on the ballistic strength of opaque and transparent armor", *Ceram. Eng. Sci. Proc.*, 28: 45-55, (2008).
- [3] Hazell P.J., Roberson C.J., Moutinho M., "The design of mosaic armour: the influence of tile size on ballistic performance", *Journal of Material and Design*, 29: 1497-1503, (2008).
- [4] Krishnan K., Sockalingam S., Bansal S., Rajan S.D., "Numerical simulation of ceramic composite armor subjected to ballistic impact", *Journal of Composites*, B41: 583-593, (2010).
- [5] Ong C.W., Boey C.W., Hixson R.S., Sinibaldi J.O., "Advanced layered personnel armor", *International Journal of Impact Engineering*, 38: 369-383, (2011)
- [6] Evcı C., Gülgeç M., "An experimental investigation on the impact response of composite materials", *International Journal of Impact Engineering*, 43: 40-51, (2012).
- [7] Tan P., "Ballistic protection performance of curved armor systems with or without debondings/delaminations", *Materials and Design*, 64: 25-34, (2014).
- [8] Wilhelm M., Kornfeld M., Wruss W., "Development of SiC-Si composites with fine grained SiC microstructures", *Journal of Eur. Ceram. Soc.* 19: 2155-2163, (1999).
- [9] Garcia-Avila M., Portanova M., Rabiei A., "Ballistic performance of composite metal foams", *Compos. Struct.* 125: 202-211, (2015).
- [10] Jena P.K., Mishra B., Kumar K.S., Bhat T.B., "An experimental study on the ballistic impact behavior of some metallic armour materials against 7.62 mm deformable projectile", *Mater. Des.* 31: 3308-3316, (2010).
- [11] Evcı C., Gülgeç M., "Effective damage mechanisms and performance evaluation of ceramic composite armors subjected to impact loading", *Journal of Composite Materials*, 48 doi: 10.1177/0021998313508594, (2013).
- [12] Fink B.K., "Performance Metrics for Composite Integral", *American Society of Composites, Fourteenth International Conference Proceeding*, p.252, Fairborn - Ohio, Sep 26-27, (1999).
- [13] Sergio Neves Monteiro vd., "How Effective is a Convex Al₂O₃-Nb₂O₅ Ceramic Armour", *Journal of Ceramics International*, S0272-8842(15)02445-1, (2016).
- [14] ANSYS Autodyn, ANSYS Workbench Release 15.0, 2013.
- [15] Ballistic Resistance of Body Armor NIJ Standard-0101.06, U.S. Department of Justice, (2008).
- [16] Standardization Agreement (STANAG) 4569 ed.2, AEP-55, NATO Standardization Agency (NSA), (2012).

-
- [17] Johnson G.R., Holmquist T.J., "An Improved Computational Constitutive Model for Brittle Materials", Joint AIRA/APS Conference, Colorado Springs, Colorado, (1993).
- [18] Johnson G.R., Holmquist T.J., "Response of boron carbide subjected to large strains, high strain rates and high pressures", Journal of Appl. Phys., 85:8060-8073, (1999).
- [19] Autodyn Composite Modeling, Release 15.0, ANSYS Inc., 2013.

