

SİLİSYUM KARBÜR SERAMİK GÖĞÜS PLAKA ZIRHINDAKİ MALZEME KUSURLARININ ÇATLAK YAYILIMI ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN SAYISAL MODELLENMESİ

Koray Kaya¹, M. Bartu Ünal², M. Emin Akca³

1. GİRİŞ

Seramik vücut zırhı, mükemmel balistik performansı nedeniyle askeri ve kolluk kuvvetleri tarafından yaygın olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte, gözeneklilik, tane büyümesi ve biçimsel düzensizlik (kompozisyonel homojensizlik) gibi malzeme kusurlarının varlığı, seramik malzemelerin mekanik özelliklerini ve balistik performansını önemli ölçüde etkileyebilir [7]. Bu yazı, 7.62 mm zırh delici mühimmata karşı içerisinde kusurlar buluna seramik göğüs plakalarının çatlak ilerlemesi üzerindeki etkisinin sayısal model ile incelenmesini sunmaktadır.

LS-DYNA yazılımı [2] yardımı ile uygulanan sonlu elemanlar yöntemi, malzeme kusurları olan ve olmayan seramik

göğüs plakalarının çarpma anındaki balistik davranışını modellemek için kullanılmıştır. Silisyum karbür (SiC) seramikler için Johnson-Holmquist (JH-2) [3] malzeme modeli kullanılmıştır. Kusurları modele dahil etmek için üç farklı yaklaşım kullanılmıştır:

- Gözenekliliği kapsamak için gerilme direncinin stokastik (istatistiksel olarak çözümlene edilebilen ancak tam olarak tahmin edilemeyen rastgele bir olasılık dağılımına veya modeline sahip olan) modellenmesi,
- Tane büyümesini temsil etmek için belirli elementlerin sağlamlık direncinin değiştirilmesi,
- Kompozisyonel homojensizliği temsil etmek için belirli elementlerin yoğunluklarının değiştirilmesi.

¹ İnş. Yük. Müh., - koray.kaya@nurolteknoloji.com

² Mak. Müh., - bartu.unal@nurolteknoloji.com

³ Malz. Müh., - emin.akca@nurolteknoloji.com

Sayısal modellerin sonuçları, balistik testin X-ışını görüntüleriyle karşılaştırılmasıyla doğrulanmıştır.

Sayısal modelleme sonuçları; malzeme kusurlarının çözümlenmeye girmesinin, seramik göğüs plakası zırhındaki çatlak ilerleme davranışı üzerinde önemli bir etkisi olduğunu ortaya koymuştur. Çözümlemeler sonucunda gözenek, tane büyümesi ve bileşimsel düzensizlik içeren göğüs plakaları, içermeyenlere kıyasla daha yüksek derecede hasar, farklı bir çatlak ilerleme deseni ve hasar dağılımı sergilemiştir.

Savunma sanayi alanındaki teknolojik gelişmeler ile göğüs plakalarının askeri personele yeterli koruma sağlanması giderek daha hayati bir önem kazanmıştır. Göğüs plakaları bir yandan mühimmat etkileşimine dayanırken, diğer yandan da darbenin enerjisini dağıtarak potansiyel olarak ölümcül yaralanmaları önleme kapasitesi taşımaktadır. Ayrıca, otomatik silahlara karşı en iyi şekilde savunma sağlamak için çoklu darbelere karşı direnç vazgeçilmez bir gerekliliktir. İleri (teknik) seramikler; üstün sertlikleri, uygun dirençleri ve düşük yoğunlukları nedeniyle metallere göre çok sayıda üstünlük taşımakta ve bu durum, seramik malzemelerin zırhlarda kullanılmasını öne çıkarmaktadır.

SiC bazlı gözenekli seramiklerin kullanımı bu alanda en önemli gelişmelerden biri olarak görülebilir. Düşük yoğunluk, yüksek sertlik, yüksek termal şok direnci, düşük termal genişleme katsayısı, yüksek korozyon direnci, uygun ısı direnci, iyi derecede kimyasal denge ve olağanüstü mekanik özellikler gibi özelliklerin benzersiz bileşimi, gözenekli SiC seramikleri çok farklı alanlar için oldukça umut verici hale getirmektedir. Bununla birlikte; bu malzemeler, doğası gereği kırılğan olup düşük tokluktur. Bu da onları malzeme kusurlarına duyarlı kılar. Seramiklerde kusurların bulunması, çatlakların yayılmasını kolaylaştırarak, malzemenin balistik performansını tehlikeye atabilir.

Seramik ve seramik kompozit zırhların benzetimi için çeşitli modeller geliştirilmiştir. *Krishnan ve arkadaşları* [4] LS-DYNA kullanarak Bor-Silisyum Karbür (BSC) seramikli bir göğüs plakasının balistik benzetimini hazırlamıştır. Uygun ve doğru şekilde ince ayarları yapılmış değişkenleri taşıyan JH-2 malzeme modeli ile, hasarı yakalamak için akla uygun bir yaklaşım sağlanmasına karşın, çatlak modelleri doğru bir şekilde gözlemlenememiştir. *Hong ve*

diğerleri [5] katmanlı seramiklerin göğüs plaka zırhı malzemesi olarak uygulanmasını amaçlamıştır. Ara katmanları olan SiC'nin, esnek bir zırh ceketi ile birlikte kullanıldığı balistik darbe altında iyi bir enerji emme yeteneği olduğu görülmüştür. *David ve arkadaşları* [6] farklı malzemelerden yapılmış ve farklı balistik enerji sönümlenme mekanizmaları sergileyen göğüs plakası zırh sistemlerini incelemiş ve bu vücut zırhı sistemlerinin balistik performansını ve enerji sönümlenme mekanizmalarını etkileyen temel etkenleri belirlemişlerdir. Bu çalışma sırasında, araştırmalarının bir parçası olarak SiC ve türevlerini de incelemişlerdir. *Shen ve arkadaşları* [7] da rastgele malzeme özellikleri bulunan mozaik SiC/UHMWPE kompozit zırhların balistik güvenilirliğini incelemiş ve farklı mermi hızlarında kısmi ve tam işleme sonuçlarını gösteren testler gerçekleştirmiştir. Bu çalışmada, en az bozunma elde etmek için Monte Carlo yöntemini kullanarak bir olasılık kısıtlaması ile en uygun durumun oluşturulması durumu yaratılmıştır.

Tüm bu çalışmalar seramik malzemelerin balistik davranışları üzerine birçok açıklık getirirse de, literatürde SiC seramiklerdeki üretim kaynaklı kusurları hesaba katan bir çalışmanın bulunmadığı gözlemlenmiştir. Bu çalışma, kusursuz ve homojen modellenmiş seramik yapılardan uzaklaşarak, seramiklere rastgele modellenmiş kusurları da göz önüne alarak balistik performansı daha gerçekçi bir şekilde değerlendirmeyi amaçlamaktadır.

2.YÖNTEM

Hesaplmalı balistik çözümlenmeler, en yaygın olarak kullanılan *Lagrangian*, *Eulerian*, *Arbitrary Lagrangian-Eulerian* (ALE) ve *Structured ALE* (S-ALE) yöntemleri gibi yaklaşımlar ile gerçekleştirilmektedir. *Lagrangian* ve *Eulerian* yaklaşımları, bu yazıda konu edilen terminal balistik çözümlenmenin sayısal modellemesinde kullanılmaları nedeniyle kısaca açıklanmıştır.

Lagrangian yönteminde, sabit kütleyle sahip elemanların hareketini hesaplamak için örgü yapısı üzerindeki örgü düğümlerinin sabit olduğu varsayılır. Gövde şekil değişimine uğradığında (deforme olduğunda) ağ düğümleri malzeme ile birlikte hareket eder. Küçük bir gerinim miktarı için tüm malzeme noktalarını yakalaması sayesinde doğru sonuçlar verir, böylece kütle korunumu ilkesi karşılanır. Bu yöntemi kullanmanın en büyük üstünlüğü,

hesaplama açısından daha kolay olmasıdır. Bununla birlikte, balistik deformasyon sürecinde elemanlar yüksek oranda deforme olduğundan, *Lagrangian* çözümündeki sonucun doğruluğu önemli ölçüde azalabilir. Gerçekçi olmayan çözümleri önlemek için küçük zaman adımları ve malzeme hasar modeli dikkatle seçilmelidir.

Eulerian yönteminde, örgü düğümleri çözümleme süreci boyunca örgü yapısında sabittir. Malzeme, örgü üzerinde bir elemandan diğerine hareket eder, dolayısıyla kütle korunur. Ağ yapısındaki elemanlar arasındaki malzeme taşınımı, elemanların bozulmasını önlemek için yeterlidir. Bu nedenle, Eulerian metodolojisi yüksek gerinim miktarları olan malzemeler için en uygun tekniklerden biridir. Öte yandan; bu yöntem, malzemenin aktarılması ve her malzeme için eleman verilerinin kaydedilmesi gerektiğinden, *Lagrangian* yaklaşımına oranla, hesaplama açısından daha zorlayıcıdır. Eulerian yönteminde ise, plastisite ve kırılmayı modellemek ve malzeme transfer ara yüzlerini izlemek zordur.

Eşitlik 1'de çarpışma modelinin matematiksel gösterimi verilmiştir. Düşümsel yer değiştirmeler, hızlar ve dış kuvvetlerden elde edilen düşümsel ivmeler bu denklemle çözülmektedir.

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = F(t) \quad (1)$$

Bu denklemde "*M*" kütle matrisini, "*C*" sönümlenme matrisini, "*u*" yer değiştirme matrisini ve "*K*" sertlik matrisini temsil etmektedir.

Çarpma anına yönelik balistik çözümlerlerde, kolay uygulama ve düşük bellek depolama sayesinde çoğunlukla *explicit* entegrasyon kullanılmaktadır. *Explicit* çözümlerlerde yöntemin doğru kullanılabilmesi için kararlı doğası nedeniyle kritik zaman adımı kısıtlaması dikkate alınmalıdır. Kritik zaman adımı modelin en büyük doğal frekansına sahip eleman tarafından denetlenir. Kritik zaman adımının matematiksel ifadesi *Eşitlik 2*'de gösterilmiştir.

$$\Delta t = \Delta \frac{\ell_s}{c} = \ell_s \sqrt{\frac{\rho}{E}} \leq \Delta t_{cr} = \frac{2}{w_{max}} \quad (2)$$

Bu eşitlikte "*l_s*" elemanın minimum kenar uzunluğunu, "*ρ*" yoğunluğunu, "*w_{max}*" sistemin en yüksek frekansını ve "*E*"

malzemenin esneklik (*Young*) modülünü temsil etmektedir. Bu eşitlikle, zaman adımının kütle yoğunluğunun kareköküyle doğru orantılı olduğu görülmüştür.

2.1 Malzeme Modelleri (Bünye Eşitlikleri)

2.1.1 Johnson-Cook (JC) Modeli

Malzemenin hidrostatik tepkisini tanımlayan durum denklemi, aşağıda *Eşitlik 3*'te gösterildiği gibi basınç, yoğunluk ve iç enerjinin bir fonksiyonu olarak Mie-Gruneisen seçilmiştir.

$$\Gamma = \frac{1}{\rho} \left(\frac{\delta p}{\delta e} \right) v \quad (3)$$

Bu eşitlikte "*ρ*" yoğunluk, "*e*" iç enerji, "*Γ*" ise *Gruneisen* değişkenini göstermektedir.

Johnson-Cook (JC) materyal modeli, yüksek gerinim hızları için kullanılan ve plastik ısınma nedeniyle malzeme yumuşatan gerinim ve sıcaklığa duyarlı plastikleşme modelidir. Bu bünye modelinde akma gerilmesi; efektif plastik gerinim, gerinim oranı ve sıcaklığın bir fonksiyonu olarak kabul edilir. Bu malzeme modeli, matematiksel olarak *Eşitlikler 4-6* ile ifade edilmektedir.

$$\sigma_y = [A + B\varepsilon_p^n][1 + C \ln \varepsilon^*][1 - T^{*m}] \quad (4)$$

$$T^* = \frac{T - T_{ref}}{T_m - T_{ref}} \quad (5)$$

$$\varepsilon^* = \frac{\dot{\varepsilon}_p}{\dot{\varepsilon}_0} \quad (6)$$

Bu eşitliklerde "*A*" akma gerilmesi, "*B*" şekil değiştirme sertleşme katsayısı, "*C*" şekil değiştirme oranı katsayısı, "*n*" şekil değiştirme sertleşme üsteli, "*ε_p*" efektif plastik gerinim, "*ε₀*" yarı statik çekme testlerinde kullanılan (referans) gerinim, "*ε**" normalleştirilmiş efektif plastik gerinim, "*T_m*" erime sıcaklığı ve "*T_{ref}*" referans sıcaklığı göstermektedir. Mühimmatın çekirdeği bu bünye denklemleri ile modellenmiş, çözümlerlerde kullanılan model bilgileri de Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Sertleştirilmiş Çelik Çekirdek İçin Kullanılan JC Modeli			
Bölüm	Malzeme	Model	Kaynak
Çekirdek	Sertleştirilmiş çelik	JC(MAT_015)	Weiss et. al. (2012) [8]

Mühimmatın kırılma mekanizması, yüksek deformasyon, yüksek gerinim oranları, yüksek sıcaklıklar ve basınçlar gibi etkenlerin balistik çözümlenmeye etkisine bağlıdır. Kırılma mekanizmasını doğru bir şekilde modellemek için modelleme sırasında bu etkenler özenle sorgulanmalıdır. Gerçekçi bir durum elde etmek için, belirli elemanların dayanabileceği en fazla etkili plastik gerilmeye dayalı olarak hasar değişkenleri belirlenir. Bu elemanlar kritik gerilme sınırına ulaştıklarında, sonlu eleman modelinden çıkarılırlar. Bu yaklaşım basit ve kısa bir hesaplama çözümü sunar. Bununla birlikte, gerinim hızı etkilerini ve sürekli hasar mekanizmalarını göz ardı etmek gibi sınırlamaları vardır.

Çarpışmalar sırasında çatlak modellerinin yaklaşık olarak kestirilmesi, özellikle hasar ve hasar modellerine odaklanılmasını gerektiren ilginç bir konudur. Hasar, malzemenin parçalanması ile tanımlanır ve örnek içinde yeni yüzeylerin ortaya çıkmasına yol açar. Hasar ilerledikçe, bu süreksizliklerin etrafında gerilme yoğunlaşmaları oluşur.

Malzeme tepkileri hacimsel ve deviatorik (hacmin değişmediği ama şekil bozukluklarının olduğu) davranışlar olarak iki sınıfa ayrılır. Plastik deformasyona öncelikle şekil değişikliklerinden sorumlu olan deviatorik kısım etki etmektedir.

2.1.2 Johnson-Holmquist (JH-2) Seramik Modeli

Gevrek malzemeler için hazırlanan Johnson-Holmquist bünye modelinde (MAT_110), hacimsel artış da içinde olmak üzere basınç-hacim ilişkisine dayalı olarak hem sağlam hem de kırılmış malzemenin direncinin özel bir gösterimi vardır. Ayrıca, sağlam ve kırılmış durumlar arasında bir geçiş rejimi de gözlenebilir. Denklemin basitliği için normalizasyon işlemi gerçekleştirilir. Normalize edilmiş eşdeğer gerilme, Eşitlik 6'da gösterilmiştir.

$$\sigma_i^* = A(P^* + T^*)^N(1 + C \ln \varepsilon^*) \quad (6)$$

► Hasar:

$$\sigma_i^* = \sigma_i^* - D(\sigma_i^* - \sigma_f^*) \quad (7)$$

Eşitlik 7'de yer alan " σ_i^* " normalleştirilmiş sağlam eşdeğer gerilmeyi, " σ_f^* " normalleştirilmiş kırılma gerilmesini ve " D " hasar parametresini temsil etmektedir. ($0 < D < 1$)

► Kırılma:

$$\sigma_f^* = B(P^*)^M(1 + C \ln \varepsilon^*) \quad (8)$$

$$\sigma^* = \sigma / \sigma_{HEL} \quad (9)$$

Eşitlikler 8 ve 9'da belirtilen " σ " gerçek eşdeğer gerilmeyi, " σ_{HEL} " Hugoniot esneklik limitindeki (HEL) eşdeğer gerilmeyi temsil etmektedir.

Kırılma hasarı, plastik gerilmelerin toplamının eşdeğer kırılma plastik gerilme değerine oranı olarak açıklanmaktadır. [9] Eşitlik 10'da, bunun matematiksel gösterimi verilmiştir.

$$D = \sum \frac{\Delta \varepsilon_p}{\varepsilon_p^f} \quad (10)$$

$$\varepsilon_p^f = D_1(P^* + T^*)^{D_2} \quad (11)$$

Eşitlik 11'deki " D_1 " ve " D_2 " sabit hasar parametreleridir. " P^* " ve " T^* " ise sırasıyla, normalleştirilmiş basıncı ve normalleştirilmiş en fazla çekme hidrostatik basıncını göstermektedir.

Seramik kırılğan bir malzemedir, bu nedenle az miktarda plastik gerilme enerjisine maruz kaldığında çatlaklar aniden ilerler ve seramiğin çoklu atış performansını etkiler. JH-2 ile modellemenin fiziksel olarak açıklaması: Gevrek seramik malzemenin sabit basınç altında ve sürekli kayma gerinimine maruz kalma durumundaki davranışının incelenmesidir. Artan gerinimler ile hasar birikmeye başlar. Malzeme, artan plastik akış altında daha büyük bir parçacık boyutundan daha küçük bir parçacık boyutuna şekil değiştirmesi nedeniyle yumuşamaya başlar. Hasar birikim oranı 1'e ulaştığında malzeme tamamen kırılmış olarak tanımlanır. Kırılmadan sonra, Eşitlik 12'de gösterildiği gibi, şişme (basınç artışı ve hacimsel gerinim artışı) nedeniyle hidrostatik basınç artar. İç enerjideki artışa neden olan bu durum " ΔP " miktarı kadar potansiyel iç enerjiye dönüşür. [9] Bu da hasarın artmasına bağlı olarak deviatorik gerilmelerinin azalmasına yol açar.

$$P = K_1 \mu + K_2 \mu^2 + K_3 \mu^3 + \Delta P \quad (12)$$

JH-2 bünye eşitlikleri çarpma anındaki balistik testlere dayalı olarak karakterize edilmiş ve literatürden elde edilen malzeme modelinin bilgileri Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Balistik Seramik İçin Kullanılan JH-2 Model Bilgileri

Bölüm	Malzeme	Model	Kaynak
Seramik	Silisyum karbür (SiC)	JH-2 (MAT_110)	Cheng et al. (2021) [10]

2.1.3 Modified Johnson-Cook (MJC) Modeli

Adyabatik ısıtma Johnson-Cook'un malzeme formülasyonuna konulmuştur. Bu modelin gerilme tepkisi aşağıda Eşitlik 13'de belirtilmiştir.

$$\sigma_{eq} = (A + B\varepsilon_{eq}^n) \left(1 + \frac{\dot{\varepsilon}_p}{\dot{\varepsilon}_n}\right) (1 - T^{*M}) \quad (13)$$

Eşitlik 13'te yer alan "A, B, C, n ve m" JC, malzeme modeli değişkenleridir. " ε_{eq} " eşdeğer plastik şekil değiştirme ve $\dot{\varepsilon}_p/\dot{\varepsilon}_n$ normalize edilmiş eşdeğer plastik şekil değiştirme oranıdır. Çözümlemede kullanılan ve literatürden elde edilen malzeme özellikleri aşağıda Tablo 3'te listelenmiştir.

Tablo 3. Pirinç ve Kurşun İçin Kullanılan MJC Model Değişkenleri [11]

Bölüm	Malzeme	Model	Kaynak
Ceket	Pirinç	MJC (MAT_107)	Flores-Johns et al (2011) [11]
Başlık	Kurşun		

Kırılma modeli olarak aşağıda Eşitlik 14'te açıklandığı gibi gerilme ve gerinime dayanan Cockroft-Latham kırılma mekanizması yeğlenmiştir.

$$D = \frac{1}{W_{cr}} \int_0^{\varepsilon_{eq}} (\sigma_1, 0) d\varepsilon_{peq} \quad (14)$$

" σ_1 " maksimum asal gerilmeyi, " W_{cr} " ise toplam plastik işi belirten *Cockroft-Latham* değişkenleridir. Bu hasar mekanizmasında, " $D=1$ " 'e ulaştığında malzeme tamamen hasara uğramış kabul edilir. JC ve MJC arasındaki temel farklar, gerinim oranı bağımlılığı ve performans ölçütleridir. *Cockroft-Latham* değişkenleri, gerilme-şekil değiştirme eğrisini veren basit bir tek eksenli çekme testi yapılarak kolayca elde edilir ve bu eğrinin altındaki alan ise, plastik işi göstermektedir.

2.2 Kusur Eklemeli Malzeme Modeli Oluşturulması

Kusurları malzeme modeline eklemek için üç farklı yön-

tem tasarlanmıştır. Bu yöntemler göğüs plakası üretimi sırasında seramik malzemelerde oluşan kusurları en gerçekçi şekilde modellemeyi amaçlamaktadır. Bu yöntemler detaylı olarak aşağıda özetlenmiştir:

- Çekme direnci, malzeme gövdesindeki gözenekliliği temsil edecek şekilde değiştirilir.
- Malzemenin atomik çekim kuvvetlerini modellemek için bası direnç değerleri değiştirilir.
- Malzeme bileşiminin değişimini simüle etmek için eleman yoğunluğu değiştirilir.

Seramik üretim deneyiminde, kalınlık boyunca oluşan katmanlarda malzemenin mikroyapısal olarak farklılıklar gösterdiği gözlemlenmiştir. Ayrıca, hedef ve mühimmat etkileşiminde malzeme özelliklerinin kalınlık boyunca değişmesi, göğüs plakası performansının daha gerçekçi bir şekilde simüle edilebilmesi için bu yöndeki katmanlarda yukarıda özetlenen yöntemlerin uygulanması sonucunu ortaya çıkarmaktadır. Bu nedenle seramik gövde üzerinden belirli malzeme özelliklerine sahip dört farklı katman yüzeyi oluşturulmuştur. Malzeme özellikleri literatür [10] ve balistik deneye dayalı olarak belirlenmiştir.

3. SAYISAL ÇALIŞMALAR

Sayısal modeller, göğüs plakalarındaki çatlak ilerleyiş örüntülerini incelemek için önemli bir yöntemdir. Hesaplamalı mekanik modeller kullanılarak bileşimsel düzensizlik ve gözeneklilik gibi çeşitli etkenlerin çatlak başlangıcı, yayılımı ve dağılımı üzerindeki etkileri araştırılmıştır.

Bu bölümde kusurluluğun göğüs plakasında gelişen çatlak paternleri üzerindeki etkisinin sayısal örnekler üzerinden incelenmesi amaçlanmıştır. Güncel hesaplama teknikleri kullanılarak, farklı kusur durumlarının 7.62 x 63 M2AP mühimmatına karşı davranışı incelenmiştir. Kusurlu göğüs plaka zırhlarının çatlak örüntüleri kusurlu olmayanlarla karşılaştırılarak, kusurun çatlak başlangıcı, yayılma yolları ve genel yapısal bütünlük üzerindeki etkisine ilişkin yaklaşımlar ortaya konulmuştur.

Bu bölümün bulguları, göğüs plakası tasarımının, üretim süreçlerinin ve kalite kontrol önlemlerinin iyileştirilmesine katkıda bulunabilir. Kusurların göğüs plakası performansı üzerindeki etkisini göstermek için, kusurlu ve kusursuz olmak üzere iki farklı terminal balistik çözümler-

me gerçekleştirilmiş ve çözümlene sonuçları, gerçekleştirilen balistik deney sonuçları ile aşağıdaki bölümlerde ayrıntılı olarak irdelenmiştir.

3.1 Homojen Göğüs Plakası Çözümleme Sonuçları

Bu bölümde 870 m/s hız ile başlangıç koşulları tanımlanan 7.62 x 63 M2AP mühimmatına karşı homojen göğüs plakasının davranışı incelenmektedir. Çatlak oluşumu ve enerji sönümlenmesi incelenmiş ve Türk Akreditasyon Kurumu (TÜRKAK) tarafından TS EN ISO/IEC 17025:2012 standardına göre tam akreditasyona sahip olan Nurol Teknoloji Atış Poligonu'nda elde edilen deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Model özellikleri Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4. Sonlu Elemanlar Modeli Bölümler ve Eleman Sayıları

Bölüm	Eleman Sayısı
Çekirdek	50.399
Ceket	4.891
İtici	1.094
Polietilen	151.668
E-cam	328.386
Seramik	2.251.002

Malzeme kalibrasyonu sırasında kullanılan eleman tipleri ortaya herhangi bir tutarsızlık çıkmaması için çözümlenmelerde de doğrudan kullanılmıştır.

Şekil 1'deki sonuçlar niteliksel olarak karşılaştırıldığında, sonuçların çok benzer olmadığı görülmektedir. Bu du-

rum, hatalı çözümlene sonuçları nedeniyle zırhın çoklu atışa karşı koyma yeteneğinin yanlış yorumlanmasına yol açmaktadır. Sayısal çözümlene sonucunda elde edilen benzetimler, çatlakların başlaması ve yayılmasına ilişkin değerli bilgiler sağlamış olsa da, deneysel testler sırasında gözlemlenen gerçek çatlak modelleri ile karşılaştırıldığında ciddi farklılıklar olduğu gözlemlenmiştir. Bu farklılık malzeme içerisine eklenecek kusurların çatlak ilerleme sürecini etkileyebileceğini düşündürmektedir.

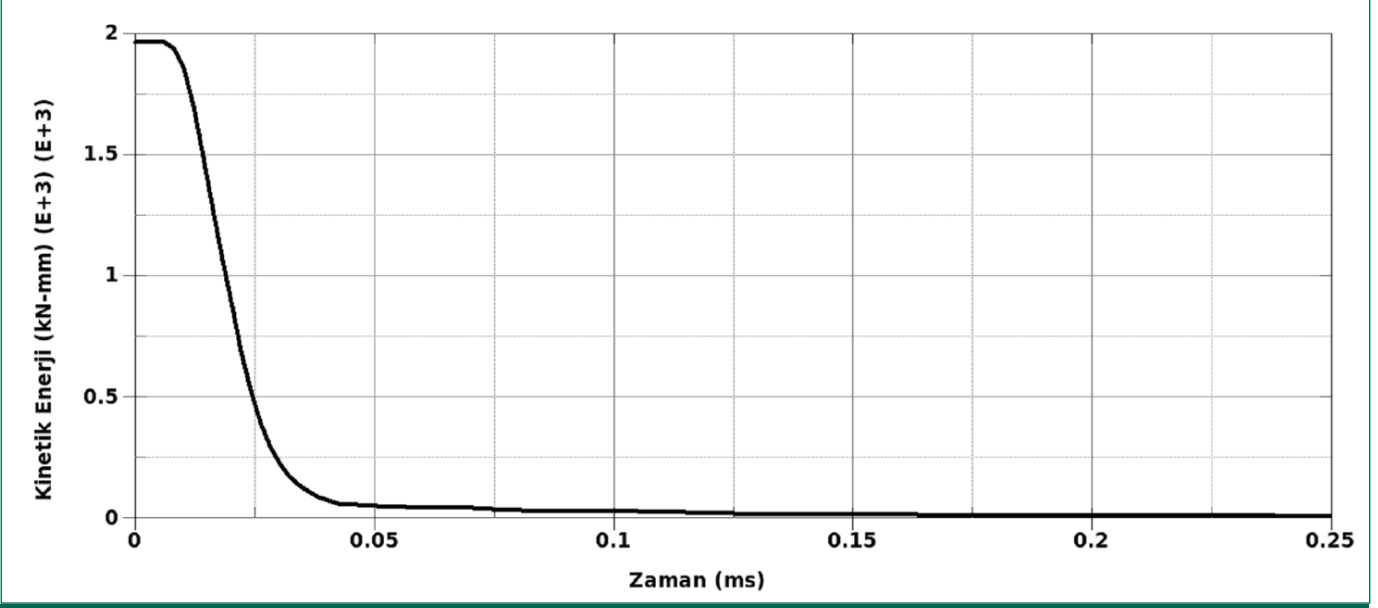
Sayısal çözümlene ile deneysel sonuçlar arasındaki bir diğer önemli fark da mühimmatın aşınması ile ilgilidir. Kusur içermeyen gövde zırhı, sayısal benzetimlerde daha sert ve daha güçlü bir davranış sergilemiş, bu da deneysel bulgulara oranla farklı enerji dağılım özellikleriyle sonuçlanmıştır. Bu tutarsızlık, balistik darbe sırasında oluşan karmaşık enerji aktarım mekanizmalarını tam olarak yakalayamayan malzeme modellemesinin karmaşıklığına bağlanabilir.

Kusursuz olan göğüs plakası Şekil 2'de görüldüğü üzere mühimmat çekirdeğinin kinetik enerjisini sönümlendirmektedir. Beklendiği üzere enerji gerçek duruma göre daha hızlı ve fazla sönümlenmektedir. Bu da malzeme modelinin çok daha güçlü davrandığını, dolayısıyla çözümlenmeden elde edilen sonuçların güvenilir olmadığını göstermektedir.

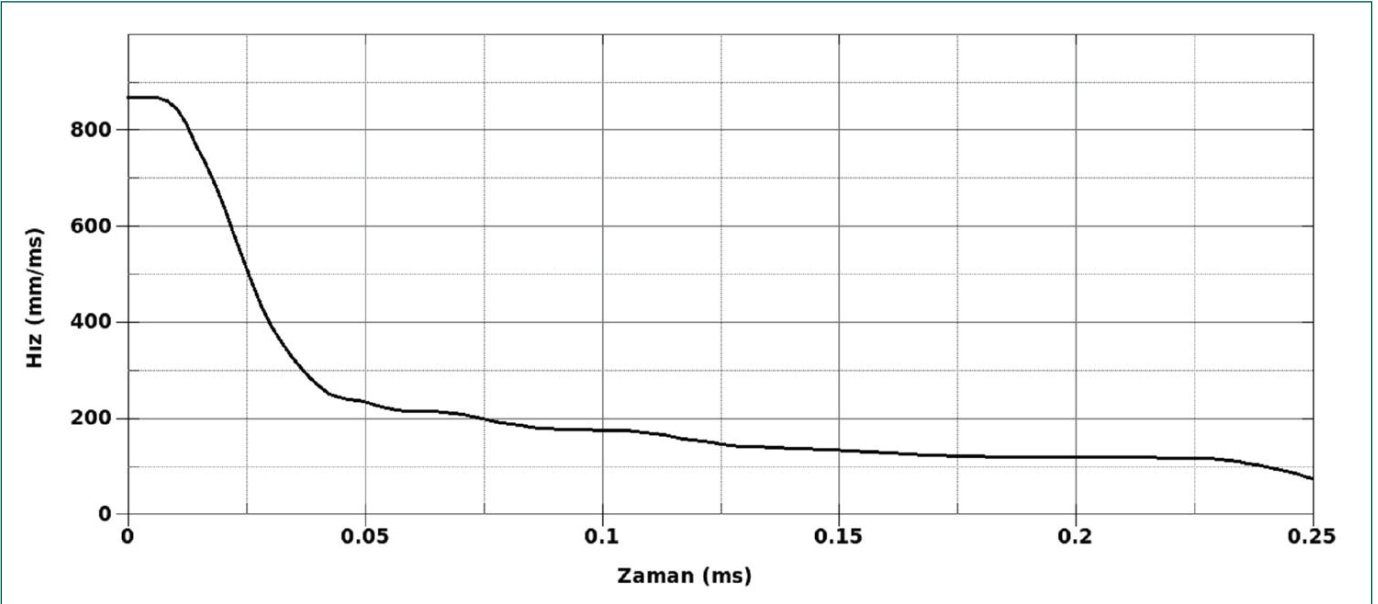
Şekil 3'te mühimmat ile vücut zırhı arasındaki etkileşim sırasında mühimmatın hızında meydana gelen düşüş görülmektedir. Test örneklerindeki kusurlar nedeniyle deney ile elde edilen duruma kıyasla çok daha büyük bir düşüş gözlemlenmiştir.



Şekil 1. Kusursuz Vücut Zırhının Terminal Balistik Çözümlemesinden ve Balistik Atış Testinden Sonra Oluşan Çatlak Örüntüleri



Şekil 2. Homojen Göğüs Plakasına Karşı Mühimmatın Zamana Bağlı Kinetik Enerji Grafiği

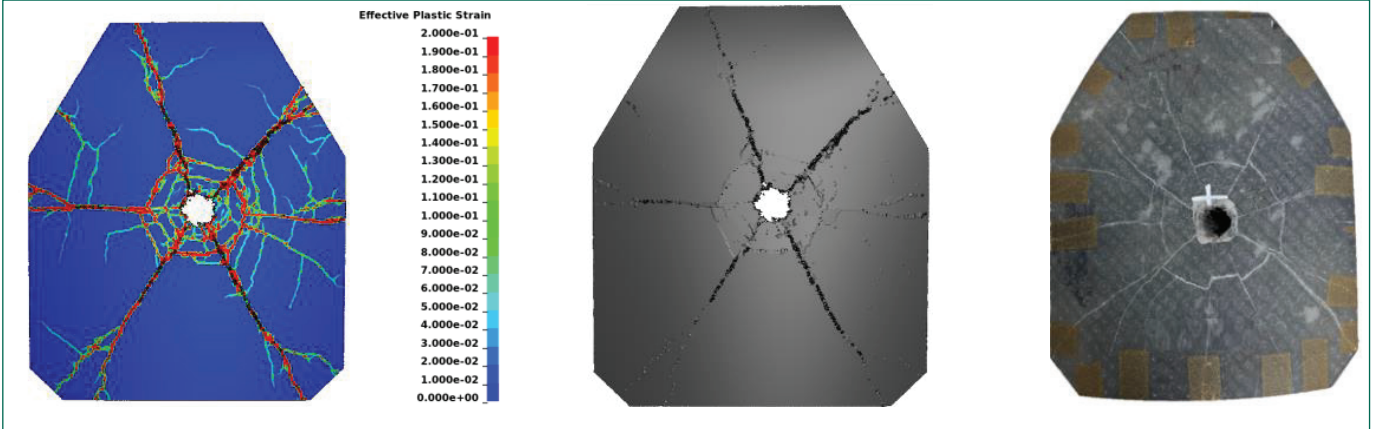


Şekil 3. Homojen Göğüs Plakasına Karşı Mühimmatın Zamana Bağlı Hız Grafiği

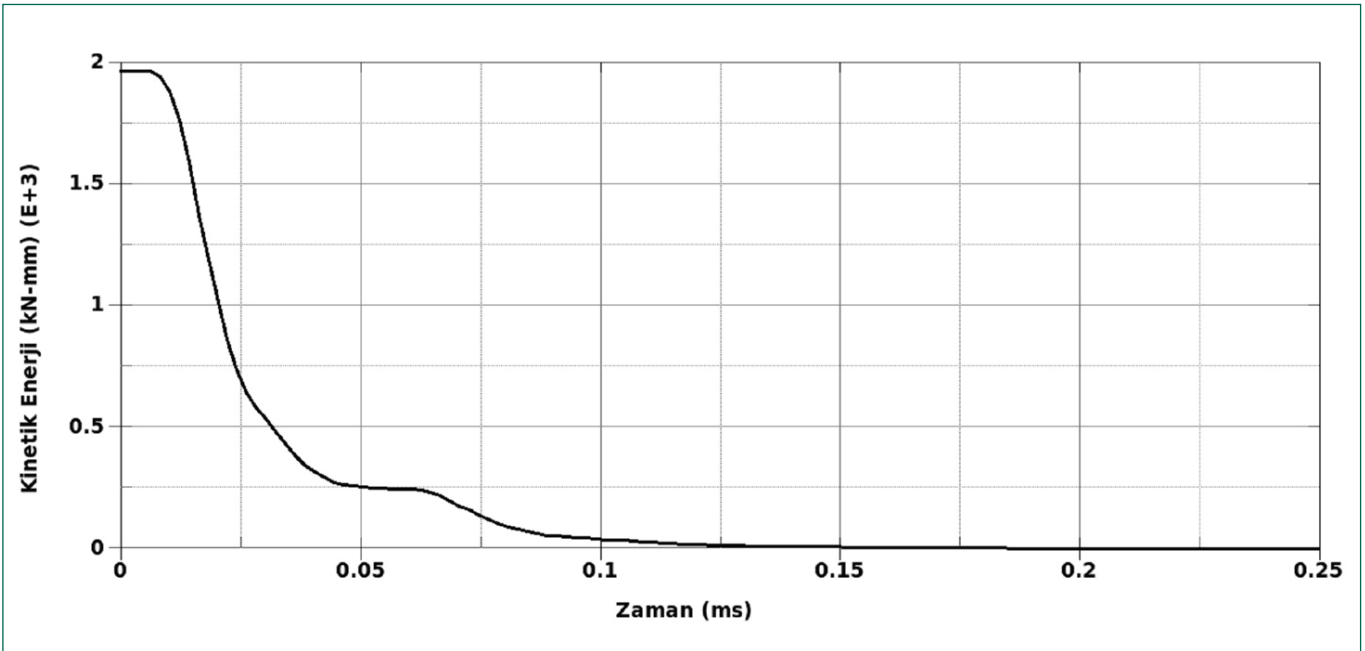
Kusursuz göğüs plakasının sayısal çözümü değerli bilgiler sağlarken, deneysel sonuçlara kıyasla çatlak modellerinde ve enerji sönümlenme mekanizmalarında gözlemlenen farklılıklar, hesaplama modellerinin daha da iyileştirilmesinin önemini vurgulamaktadır. Bu farklılıkları ele alarak, sayısal modeller sonucunda elde edilen benzetimler tahmin yeteneklerini geliştirebilir ve balistik darbe koşulları altında göğüs plaka

zırhlarının davranışının daha doğru bir temsilini oluşturulabilir.

Şekil 4'teki sonuçlar niteliksel olarak karşılaştırıldığında, çatlak örüntülerinin deneysel sonuçlarla benzer olduğu görülmektedir. Bu sonuç kusurlu çözümleme ile çoklu atış davranışı için önemli bir öngörü elde edilebileceğini ortaya koyarak kusurlu göğüs plakasının davranışı üzeri-



Şekil 4. Kusurlu Vücut Zırhının Terminal Balistik Çözümleme ve Balistik Atış Testinden Sonra Oluşan Çatlak Örüntüleri

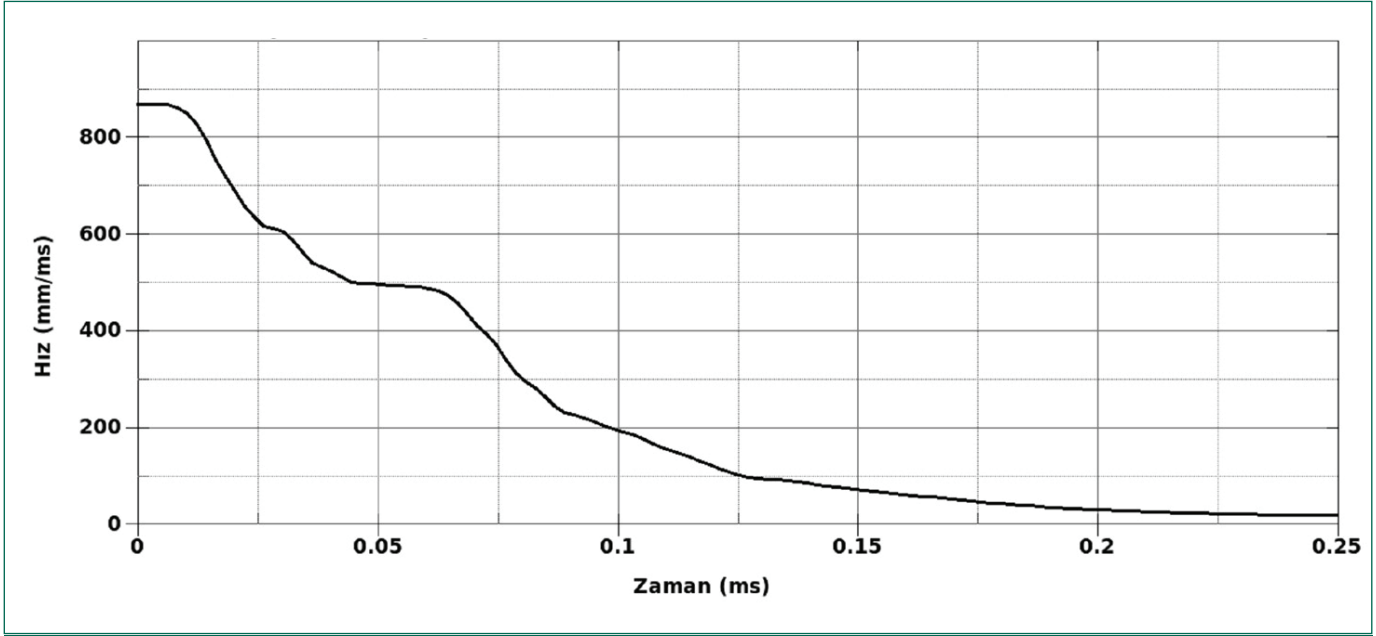


Şekil 5. Homojen Olmayan Göğüs Plakasına Karşı Mühimmatın Zamana Bağlı Kinetik Enerji Grafiği

ne sayısal model çözümlemesinin etkinliği hakkında fikir vermektedir.

Kinetik enerji sönmleme kapasitesi, göğüs plaka zırhı için en önemli performans ölçütüdür. Şekil 5'ten elde edilen sonuca göre mühimmat enerjisinin tamamı 0.25 ms'de sönmlemmektedir. Balistik atış testlerine göre de mermi enerjisinin tamamının benzer bir zaman diliminde sönmlendiği görülmüş, böylece tutarlı bir sonuç elde edilmiştir.

Şekil 6'da mühimmatın hızının neredeyse sifıra ulaştığı gözlemlenmiştir. Nurol Teknoloji Atış Poligonunda yapılan terminal balistik deneyinde de benzer bir sonuç elde edilmiştir. Ayrıca, bu grafik incelendiğinde hızdaki düşüş doğrusal bir düşüş yerine kademeli bir düşüş olarak görülmektedir. Bu da, malzeme içerisindeki homojensizliği ve gözenekliliği doğrular niteliktedir. Bu gözlem, sayısal modelden elde edilen sonuçların terminal balistik deney sonuçlarıyla gerçekçi bir şekilde örtüşüğünü tanımlamaktadır.



Şekil 6. Homojen Olmayan Göğüs Plakasına Karşı Mühimmatın Zamana Bağlı Hız Grafiği

4. SONUÇ

Seramik vücut zırhının daha gerçekçi sayısal modellemesi için, bu çalışmanın bulguları, toz metalurjisi süreçlerinin kaçınılmaz bir yönü olan malzeme kusurlarını dikkate alınmanın önemini göstermektedir. Sonuçlar; gözeneklilik, tane büyümesi ve bileşimsel düzensizliğin seramik vücut zırhındaki çatlak ilerleme davranışını önemli ölçüde etkileyebileceğini vurgulamaktadır.

Bu çalışmadan elde edilen bilgiler, gelişmiş balistik performans için seramik göğüs plaka zırhının tasarımını ve optimizasyonunu geliştirmek için kullanılabilir. Gelecekteki çalışmalarda tane sınırı kusurları ve yabancı kapanımlar gibi diğer malzeme kusurlarının seramik göğüs plaka zırhının balistik performansı üzerindeki etkisi de araştırılabilir.

KAYNAKÇA

1. C. Kaufmann, D. Cronin, M. Worswick, G. Pageau, and A. Beth, "Influence of Material Properties on the Ballistic Performance of Ceramics for Personal Body Armour," *Shock and Vibration*, vol. 10, no. 1, pp. 51–58, 2003, doi: 10.1155/2003/357637.
2. J. O. Hallquist, "LS-DYNA® Theory Manual," 2006
3. G. R. Johnson and T. J. Holmquist, "An improved computational constitutive model for brittle materials," *AIP Conf Proc*, vol. 309, no. 1, pp. 981–984, Jul. 1994, doi: 10.1063/1.46199.
4. K. Krishnan, S. Sockalingam, S. Bansal, and S. D. Rajan, "Numerical simulation of ceramic composite armor subjected to ballistic impact," *Compos B Eng*, vol. 41, no. 8, pp. 583–593, Dec. 2010, doi: 10.1016/J.COMPOSITESB.2010.10.001.
5. Y. Hong et al., "The Ballistic Performance of Laminated SiC Ceramics for Body Armor and the Effect of Layer Structure on It," *Applied Sciences* 2021, Vol. 11, Page 6145, vol. 11, no. 13, p. 6145, Jul. 2021, doi: 10.3390/APP11136145.
6. N. V. David, X. L. Gao, and J. Q. Zheng, "Ballistic resistant body armor: Contemporary and prospective materials and related protection mechanisms," *Appl Mech Rev*, vol. 62, no. 5, pp. 1–20, Sep. 2009, doi: 10.1115/1.3124644/446390.
7. Z. Shen, D. Hu, G. Yang, and X. Han, "Ballistic reliability study on SiC/UHMWPE composite armor against armor-piercing bullet," *Compos Struct*, vol. 213, pp. 209–219, Apr. 2019, doi: 10.1016/J.COMPSTRUCT.2019.01.078.
8. V. Paris, A. Weiss, A. Vizel, E. Ran, and F. Aizik, "Fragmentation of armor piercing steel projectiles upon oblique perforation of steel plates," *EPJ Web Conf*, vol. 26, p. 04032, 2012, doi: 10.1051/EPJCONF/20122604032.
9. G. R. Johnson and T. J. Holmquist, "Response of boron carbide subjected to large strains, high strain rates, and high pressures," *J Appl Phys*, vol. 85, no. 12, pp. 8060–8073, Jun. 1999, doi: 10.1063/1.370643.
10. P. Hu, Y. Cheng, P. Zhang, J. Liu, H. Yang, and J. Chen, "A metal/UHMWPE/SiC multi-layered composite armor against ballistic impact of flat-nosed projectile," *Ceram Int*, vol. 47, no. 16, pp. 22497–22513, Aug. 2021, doi: 10.1016/J.CERAMINT.2021.04.259.
11. E. A. Flores-Johnson, M. Saleh, and L. Edwards, "Ballistic performance of multi-layered metallic plates impacted by a 7.62-mm APM2 projectile," *Int J Impact Eng*, vol. 38, no. 12, pp. 1022–1032, Dec. 2011, doi: 10.1016/J.IJIMPENG.2011.08.005.