



Aluminyum Al 7075-T6 için Balistik Davranışın Sayısal Analizi

Numerical Analysis of Ballistic Behavior for Aluminum Al 7075-T6

İbrahim Uzun² , Serhat Sözeri¹ , Selen Salihoğulları¹ , Dilek Durak¹ , Zühtü Onur Pehlivanlı³ 

¹TG Savunma Sanayi Ve Elektronik, ASO 2. OSB 2014.Cd. No:20 06930 Ankara, TÜRKİYE

²Kırıkkale Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü, 71100 Kırıkkale, TÜRKİYE

³Kırıkkale Üniversitesi Metalurji Malzeme Mühendisliği Bölümü, 71100 Kırıkkale, TÜRKİYE

Başvuru/Received: 02/06/2022

Kabul / Accepted: 08/08/2022

Çevrimiçi Basım / Published Online: 31/12/2022

Son Versiyon/Final Version: 31/12/2022

Öz

Balistik amaçlı kullanılan malzemeler tek ve çok katmanlı olarak yer almaktadır. Çok katmanlı olarak kullanım nedeni, malzemelerin farklı özelliklerinin birleştirilerek toplamda balistik dayanımlarının iyileştirilmesidir. Birden çok katman kullanımı amaca yönelik olarak her zaman uygulanabilir değildir. Bu çalışmada Al 7075-T6 plaka için NIJ 0101.06 standardı seviye IIA, II ve III seviyelerinde sayısal analiz gerçekleştirilmiştir. Bu analizlerde farklı malzeme kalınlıklarında koruma gerçekleşip gerçekleşmediği ve deformasyon değerlerinin ne düzeyde olduğu gösterilmiştir. Alüminyum plaka kalınlığı 6, 8, 10, 12 mm alınarak yapılan analizlerde 9x19 mm ve 7,62x51 mm olmak üzere iki farklı mühimmat kullanılmıştır. İlgili standartta, bu mühimmatlar için belirtilen hızlar değerlendirilmiştir. Başlangıç değerleri olarak 9x19mm mühimmat için 373m/s ve 398m/s; 7,62x51 mühimmatı için ise 847 m/s hızlarında analizler tekrarlanmıştır. Her bir kalınlık için tekrarlanan analizler Ansys Workbench modüllerinden Explicit Dynamics kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çalışmada malzemelerdeki travma derinlikleri, mühimmat çekirdeğinin hız ve enerji değişimleri, elastik uzama değerleri tablo ve grafiklerle verilmiştir. Literatürdeki analitik hesaplamalar esas alınarak elde edilen sayısal değerlerle karşılaştırma yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler

“Balistik, Alüminyum 7075, Sayısal Analiz, Mühimmat”

Abstract

The materials utilized for ballistic purposes are available as single and multi-layered. The reason for use as multi-layers is to improve the ballistic resistance of the materials by combining different properties. The use of multiple layers is not always practical for the purpose. In this study, a numerical analysis has been performed for Al 7075-T6 plate at NIJ Standard 0101.06 level IIA, II and III protection levels. In these analyses, deformation rates have been indicated in addition to whether protection has occurred taking into account different material thickness. Two different ammunition, 9x19 mm and 7,62x51 mm, were used in the analyses made by taking the aluminum plate thickness of 6, 8, 10, 12 mm. In the relevant standard, the velocities specified for these ammunition have been evaluated. 373m/s and 398m/s for 9x19mm ammunition as initial values; for 7.62x51 ammunition, the analyses have been repeated at 847 m/s. Repeated analyses for each thickness have been performed by using Explicit Dynamics from Ansys Workbench modules. In the study, the trauma depths in the materials, the velocity and energy changes of the bullet core, the elastic elongation values are given in the tables and graphics. Comparisons have been made with the numerical values obtained based on the analytical calculations in the literature.

Key Words

“Ballistic, Aluminum 7075, Numerical Analysis, Ammunition”

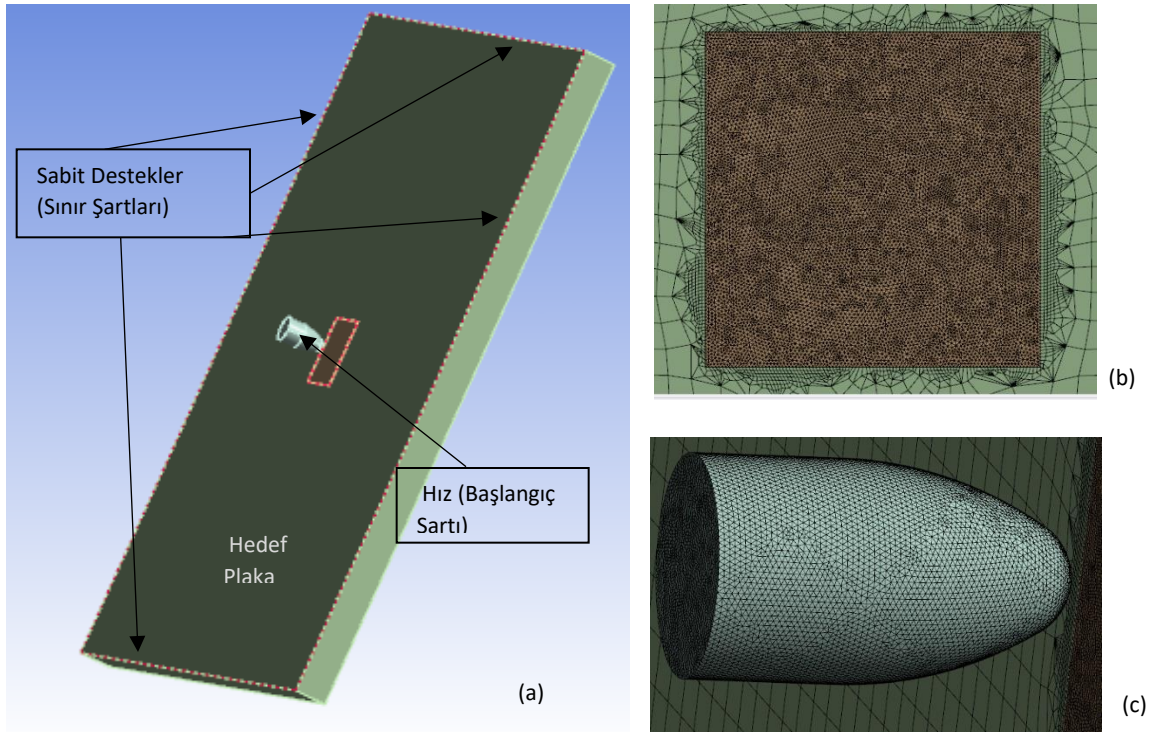
1. Giriş

Günümüz gelişen malzeme teknolojisi ile birlikte, savunma sanayisinde kullanılan kişisel koruyucu zırhlar da gelişmiştir. Bu gelişmeyle beraber koruyucu zırhlar; tekil malzemeler ve kompozit olarak çoklu bileşenlerle birlikte kullanılabilir. Malzemelerin koruma seviyelerinde hangi kalınlıklarda koruma yaptıkları, günümüzde de yoğun olarak araştırılmaktadır. Çalışmaların hem sayısal hem de analitik olarak gerçekleştirildiği görülmekle birlikte, literatürde bu doğrultuda hem malzemeler hem de koruma seviyeleri üzerine yapılan birçok araştırma bulunmaktadır. Geleneksel malzemelerin yerine metal matris kompozitlerin, performans istekleri nedeniyle kullanımları giderek artmaktadır. En iyi bilinen metal matris kompozitleri seramik parçacıklarla kuvvetlendirilmiş alüminyum alaşımlarıdır. Bu düşük maliyetli kompozitler, yüksek dayanım, sertlik ve yorulma direnci dayanımı ihtiva eder. Hibrit metal matris kompozitler; iki farklı metal parçacıktan oluşan ve metal matrise kuvvetlendirici olarak eklenen malzemelerdir. Bunlar ileri silah sistemlerinde örneğin uydu yatakları, lazer reflektörler ve inert navigasyon sistemleri gibi uygulamalarda kullanılmaktadır (Chen & Hoshi, 1992). SiC takviyeli metal matris kompozitler çok iyi sertlik, yüksek mukavemet ve termal özelliklere sahip olması sebebiyle silindir başlıkları, pistonlar, gömlek ve motor frenlerinde artarak kullanıldığı görülmektedir. Allison vd., (1993) ve Baradeswaran vd., (2013) bor karbür ile kuvvetlendirilmiş Al 7075 kompozitinin, aşınma direncinin artışıyla ilgili çalışma gerçekleştirmiş, Schneider vd.,(2011) ise, Al 6061/Al₂O₃ metal matris kompozitinin deneysel ve sayısal olarak düşük yorulma döngüsünde deformasyon davranışını incelemişlerdir. Bu çalışma sonucunda ise mikro yapıdaki basınç gerilim konsantrasyonlarının, ekstrüzyon ve çatlak oluşumu sebebiyle olduğunu tespit etmişlerdir. Otomotiv ve uzay sektöründe kullanılan parçaların komple performansını artırmaya yönelik ısrarlı talepler, kompozit malzemelerin geliştirilmesini mecbur kılmıştır. Alüminyum metal matris kompozitler endüstriyel gereklilikleri karşılamak üzere yaygın olarak kullanılmaktadır. Buna yönelik Alüminyum 6061 alaşımıyla kuvvetlendirilmiş bor karbür ve silisyum karbürün çeşitli kompozisyonları için karıştırma döküm tekniği ile alüminyum metal matris kompozit üretimi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen ürünün mekanik özellikleri incelenmiştir. Clyne & Withers (1993) tarafından üretilen çekme, eğilme, sertlik ve çarpma testleri yapılmış ve hibrit kompozitlerin saf alüminyumdan daha iyi özellik gösterdiği belirlenmiştir. Ramnath vd., (2014) tarafından Al 6061-T6 ve SAE AISI 4340 çeliğin kombinasyonları üzerine yapılan çalışmalar, zırh yapısının ara yüzlerini epoksi reçine ile kaplayarak modellenen ve plakaların 7.62 mm balistik külahlı çelik mermi ile test edilen çalışmalar da literatürde yer almaktadır. Bu çalışmanın ilk bölümünde arka plaka malzemesinin iki tabakalı seramik/metal konfigürasyonunun aynı kalınlık ve yüzey alanına sahip Al 6061-T6 ve SAE AISI 4340 çelik malzeme için; ikinci bölümde ise arka plaka kalınlığı yarıya indirilip ön tarafa aynı kalınlıkta yerleştirilerek hem Al6061-T6 hem de SAE AISI 4340 için etki analizi yapıldığı gözlemlenmiştir. Epoksi yapıştırıcı kalınlığının zırh yapılarında balistik performansa etkileri ve delinmeye karşı zırh yapısının verdiği tepki incelenmiştir. Benzer bir çalışma ise Arslan ve Güneş (2017) tarafından yapılan, seramik metal zırh yapılarının balistik performansları için kıyaslamalı sayısal incelemedir. Seramikler son yıllarda yüksek termal dirençleri, özgül dayanım ve sertlik özellikleri nedeniyle zırh yapılarında en önemli bileşen olarak kullanılmaktadır. Kırılgan yapıları nedeniyle, monolit zırh materyali olarak kullanımı tercih edilmemektedir. Mermi geometrisini deforme etmek, şok dalga enerjisini azaltmak ve çarpma yükü yayılımını düşürmek için, seramik yaygın olarak esnek malzemelerle ön plaka olarak kullanılır.

Sünek ve sert malzemeler, seramik yüzü zırh yapılarında yapısal bütünlük ve merminin atık kinetik enerjisini sönmek için genelde arka plaka olarak kullanılmaktadır. Bu konuda metaller ve fiber destekli polimer kompozitler şeklinde iki farklı malzeme kullanılmış ve FRP kompozitlerinin daha iyi performansa sahip olmasına rağmen, metallerin FRP kompozitlerden daha ekonomik olduğu ve daha iyi koruma fonksiyonu sağladıkları gösterilmiştir (Lopez-Puente vd.,(2005).Özşahin (2008) ise, alüminyum levhaların yüksek hızlı çarpma yükleri altındaki davranışları çalışmasında, alüminyum levhaların yüksek hızlı çarpma dayanımlarına mermi hızı, levha kalınlığı gibi girdilerle birlikte çeşitli performans artırıcı yöntemlerin etkilerini deneysel ve sayısal olarak incelemiştir. Sayısal çözümleme sonucunda, mermide deneysel sonuçlara benzer hasar biçimlerinin meydana geldiğini belirlemiştir. Çalışmada farklı kalınlıklarda tekil bir malzeme olarak ele alınan Al 7075-T6 üzerinde sayısal analizler gerçekleştirilmiştir. Literatürde farklı kalınlıklarda standarda uygun hızlarda atış yapılarak analiz yapılmış bir çalışmaya rastlanılmamıştır. Al 7075 matris malzemeye, farklı takviye oranlarında SiC ve B4C takviyesinin kompozit yapı üzerindeki mekanik etkileri ve üretilen kompozit numunelerin sonlu elemanlar yöntemi ile balistik performans analizleri üzerine çalışıldığı görülmüştür. Bu çalışmada farklı kalınlıklar için elde edilen sonuçlar, literatürdeki benzer çalışmalarla Baydaroğlu (2018) ve Özşahin (2008) ile karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

2. Materyal ve Yöntem

Çalışma Sayısal olarak gerçekleştirilmiştir. İncelenen geometriler değişik kalınlıklarda hedef plakası ve iki farklı mermi çekirdeğidir. Hedef plaka iki parça olacak şekilde tasarlanmıştır. mermi çekirdeğinin isabet ettiği ve deformasyonun yüksek olduğu iç bölge (25x25mm) ve bu bölgeyi çevreleyen ve sınır şartlarının da tanımlandığı dış bölge (250mmx250mm) şeklinde oluşturulmuştur. Analiz zamana bağlı olduğundan başlangıç şartları ve diğer yanda sınır değer problemi olduğundan sınır şartları söz konusudur. Başlangıç şartı olarak mermi çekirdeğine NIJ0101-06 (Jully 2008) standart ile tanımlanan 9mm için 373m/s ve 398 m/s, 7,62 mm için ise 847 m/s tanımlanmıştır. Sınır şartları ise hedef plakanın çevresel olarak atış doğrultusuna dik olan yüzeylerinin hareketsiz ve sabit olduğu kabul edilmiştir. Başlangıç ve sınır şartları Şekil 1.'de gösterilmiştir.



Şekil 1. a) Analizde tanımlanan başlangıç ve sınır şartları, b,c) İç Parça ve mermi çekirdeği ağ yapısından bir görüntü.

Ansys Explicit Dynamics analizlerinde çözülecek kısmi türevli diferansiyel denklemler kütle, momentum ve enerjinin korunumunu ifade etmektedirler. Bu denklemler bir malzeme model üzerinde başlangıç ve sınır koşullarıyla birlikte problemin tam çözümlerini tanımlamaktadırlar. Ansys Explicit Dynamics analizlerinde hesaplama düzlemindeki ağ yapısı, modellediği malzeme ile hareket eder ve bozulur böylece kütle korunumu otomatik olarak sağlanır. Herhangi bir anda yoğunluk, bölgenin mevcut hacminden ve ilk kütlelerinden belirlenebilir. Yoğunluk, momentum ve enerjinin korunumu denklemleri eşitlik (1-3) ile verilmiştir (Ansys Explicit Dynamics Analysis Guide 2021).

$$\frac{\rho_0 V_0}{V} = \frac{m}{V} \quad (1)$$

$$\rho \ddot{x} = b_x + \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z} \quad (2a)$$

$$\rho \ddot{y} = b_y + \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial z} \quad (2b)$$

$$\rho \ddot{z} = b_z + \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} \quad (2c)$$

$$\dot{\epsilon} = \frac{1}{\rho} (\sigma_{xx} \dot{\epsilon}_{xx} + \sigma_{yy} \dot{\epsilon}_{yy} + \sigma_{zz} \dot{\epsilon}_{zz} + 2\sigma_{xy} \dot{\epsilon}_{xy} + 2\sigma_{yz} \dot{\epsilon}_{yz} + 2\sigma_{zx} \dot{\epsilon}_{zx}) \quad (3)$$

Bu denklemler, zamana bağlı olduğundan her bir çözüm adımında bir önceki zaman adımının sonundaki girdileri kullanarak ilerlemektedir. Çözümün kararlılığını ve doğruluğunu sağlamak için analizde zaman artımları küçük alınır. Her bir çözüm adımında kütle, momentum ve enerji korunmaktadır. Bu çerçevede analizlerinde Johnson-Cook Mukavemeti büyük gerilmelere, yüksek gerilme oranlarına ve yüksek sıcaklıklara maruz kalan malzemelerin, tipik olarak metallerin mukavemet davranışını temsil etmek için bu model kullanılmıştır. Bu tür davranışlar, yüksek hız etkisinden kaynaklanan yoğun darbeli yüklemelerde ortaya çıkmaktadır

$$D = \sum \frac{\Delta \epsilon}{\epsilon f} \quad (4)$$

$$\epsilon^f = [D_1 + D_2 e^{D_3 \sigma^*}] [1 + D_4 \ln|\epsilon^*|] [1 + D_5 T^*] \quad (5)$$

$$\sigma = [A + B e_p^n] \left[1 + C \ln \frac{\epsilon_p}{\epsilon_0} \right] [1 - T_H^m] \quad (6)$$

Bu eşitliklerde kullanılan A, B, C, D, m, n malzeme sabitleri olup eşitlik (5) Johnson-Cook dayanım modeli eşitlik (6) ise kırılma modeli olarak bilinmektedir. Eşitlik (5) içerisindeki ilk terim basınç etkilerini, ikincisi uzama miktarı etkilerini ve üçüncüsü ise sıcaklık etkilerini göstermektedir. Bu model ile akma gerilmesi gerinim, gerinim hızı ve sıcaklığa bağlı olarak değişmektedir. Burada plastik gerinim ve kırılma gerinimi eleman içerisindeki değişken parametre olan değer 1,0 değerini aşmaya kadar malzemenin bozulmadığı ve korunduğu bu değerden sonra elemanda bozulmanın başladığı varsayılır ((Ansys Explicit Dynamics Analysis Guide 2021, Kılıç, N., Tansel D. ve Yıldırım O. 2010).

Bu çalışmada, 6, 8, 10, 12 mm kalınlıklarındaki Al 7075-T6 malzemesinin balistik koruma durumları incelenmiştir. Sayısal analizde 250x250 mm plaka boyutları ve mühimmat olarak kurşun malzemenin yapılmış 9x19 mm mermi ve 7,62x51 mm (Ball, M80) mermi kullanılmıştır. Analizde mermi başlangıç hızları NIJ0101.06'a göre;

- Seviye IIA : 9x19 mm 373 m/s ±9.1 m/s
 - Seviye II : 9x19 mm 398 m/s ±9.1 m/s
 - Seviye III : 7,62x51 mm 847 m/s ±9.1 m/s
- olarak tanımlanmıştır.

2.1. Malzeme

Alüminyum ve alaşımları benzersiz özellik kombinasyonları sayesinde en zorlu mühendislik uygulamalarına kadar pek çok yerde kullanılmaktadır. Alüminyum alaşımları sadece yapısal metal olarak kullanılan çeliklerden sonra ikinci sıradadır. Alüminyum yoğunluğunun çeliğin üçte biri kadar olması, alüminyum alaşımlarının normal çelik konstrüksiyonunun kuvvetine eşit veya daha fazla olması, şok yükleri altındaki yapılarda yüksek esnekliği ile avantaj sağlaması ve karbon çelikleri gibi kırılma hale gelmeden tokluğunu düşük sıcaklıklara kadar tutması gibi pek çok özelliği ile ön plandadır. 7000 serisi alaşımlarda ana alaşım elementi %1-8 çinko ve daha düşük bir magnezyum yüzdesi ile birleştirildiğinde, orta-çok yüksek mukavemetli, ısı işlem görebilen alaşımlarla sonuçlanır. Daha yüksek mukavemetli 7000 alaşımları, korozyon çatlağına karşı daha düşük direnç gösterir. Mukavemet, korozyon direnci ve kırılma tokluğu kombinasyonlarını sağlamak için genellikle kısa bir temperleme işlemi gerçekleştirilerek kullanıma alınmaktadır. Bu çalışmada atış yapılan plaka olarak alüminyum 7075-T6, mermi olarak 9x19 mm ve 7.62x51 mm iki tür ile çalışılmıştır. AA 7075 serisi alüminyum, yüksek yoğunluk/mukavemet özellikleri nedeniyle havacılık ve uzay sanayisinde oldukça geniş kullanım alanına sahiptir. T6 temper sıcaklığı Alüminyum 7075 alaşımları için optimum sıcaklık davranışı olarak kabul edilir. Sayısal çalışmada kullanılan AA7075-T651 serisi Alüminyum alaşımlarının kimyasal bileşenleri (Ma, 2019) Tablo 1., mekanik özellikleri (Özşahin, 2008) Tablo 2.' de ve Johnson-Cook parametreleri Tablo 3.'de yer almaktadır. Sayısal çalışmalarda, mermi çekirdeği malzemesi her iki mermi türü için SAE AISI 4340 kullanılmış olup, özellikleri Tablo 4., Tablo 5. ve Tablo 6.'de sunulmuştur (Zhirafar vd., 2007) ve (İlhak, 2019).

Tablo 1. AA 7075-T6 Alüminyum Alaşımı Kimyasal Bileşenleri (%)

Al	Cr	Cu	Fe	Mg	Mn	Si	Ti	Zn	S
Kalan	0.19	1.43	0.23	2.42	0.03	0.12	0.03	5.72	0.12

Tablo 2. AA 7075-T6 Alüminyum Alaşımı Mekanik Özellikleri

Yoğunluk (kg/m ³)	Akma Mukavemeti (MPa)	Kopma Mukavemeti (MPa)	Kopma Uzaması (%)	Elastisite Modülü (GPa)	Poisson Oranı	Kayma Mukavemeti (MPa)	Özgül Isı (J/g. °C)
2810	503	572	11	71.7	0.33	331	0.960

Tablo 3. AA 7075-T6 Johnson-Cook model parametreleri

Strain Hardening (Mpa)			Strain Rate Hardening		Temperature Softening(K)			Damage Parameters					
A	B	n	Ref.	C	Tr	Tm	m	D1	D2	D3	D4	D5	u_{pl}^f (mm)
520	477	0,52	0,0005	0,001	293	893	1	0,096	0,049	-3,465	0,016	1,099	0,0009

Tablo 4. SAE AISI 4340 Çelik Kimyasal Bileşimi (%)

C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	P	S	Fe
0.41	0.7	0.25	0.8	1.8	0.25	0.035	0.04	Kalan

Tablo 5. SAE AISI 4340 Çelik Malzeme Parametreleri

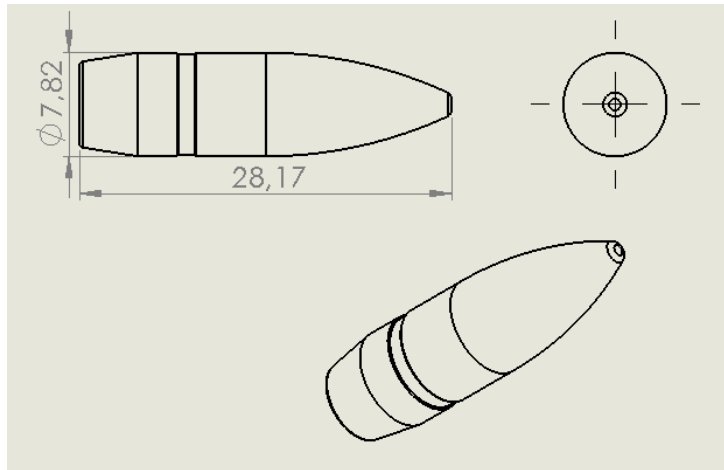
Yoğunluk	Özgül Isı Sabit Basıncı	Kayma Modülü
7830 kg.m ⁻³	477 Jkg ⁻¹ C ⁻¹	8.18e+010 Pa

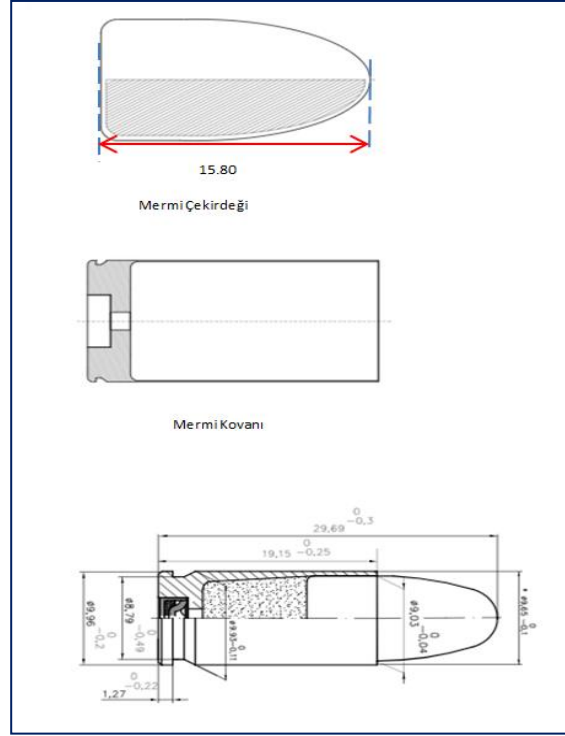
Tablo 6. SAE AISI 4340 Çelik Johnson-Cook Parametreleri

Başlangıç Akma Gerilmesi	Sertleşme Sabiti	Sertleşme Üsteli	Gerilme Oranı Sabiti	Termal Yumuşama Üsteli	Ergime Sıcaklığı	Referans Gerilme Oranı
7.92e+008 Pa	5.1e+008 Pa	0.26	1.4e-002	1.03	1519.8 °C	1s ⁻¹

2.2. Plaka ve mermiler

Plaka ve mermi çizimleri katı modelleme programları kullanılarak üç boyutlu olarak tasarlanmıştır. AA 7075-T6 plaka kalınlıkları 6, 8, 10, 12 mm boyutları ise 250x250 mm olarak çizilmiştir. Plaka mermi çekirdeği temas bölgesi ayrıca tanımlanarak eleman ve düğüm sayılarının yüksek olması sağlanmıştır. Mermi türü olarak 9x19 mm ve 7.62x51 mm (Ball, M80) NATO standardı mermileri ele alınmıştır. Mermi çekirdeğine ait teknik çizimler sırasıyla 7,62x51 mm ve 9x19 mm için Şekil 2. ve Şekil 3.'de verilmiştir. Ayrıca bu standard mermilere ait karakteristik özellikler de Tablo 7. ve Tablo 8. de sunulmuştur (<http://www.mkek.gov.tr>). Mermi çekirdklerine ilişkin görseller ise Şekil 4.'de verilmiştir.

**Şekil 2.** 7.62 x 51 mm MOD 80 NATO Mermi çekirdeği



Şekil 3. 9x19 mm NATO Mermi çekirdeği

Tablo 7. 9x19 mm NATO Mermisinin Özellikleri

Fişek Boyu	Fişek Ağırlığı	Mermi Ağırlığı	Hız	Kovan Malzemesi	Mermi Malzemesi	Kullanıldığı Bazı Silahlar	Barut
29.69	~12.15 g	8±0.075 g	370±9.1 m/s	Pirinç (CuZn30)	FMJ, Mermi Gömlek Yüksüğü Pirinç(CuZn36), Mermi Çekirdeği (Kurşun-Antimon Alaşım)	PM12S İtalyan Beretta (Hafif Makinalı), 9 mm CZ75, 9mm RUGER, 9mm MP-5 Makinalı Tüfek	Küresel Barut



Şekil 4. 9x19 mm ve 7.62x51 mm M80 NATO Mermi ve çekirdeğinin görüntüsü

Tablo 8. 7.62x51 mm M80 NATO Mermisinin Özellikleri

Fişek Boyu	Fişek Ağırlığı	Mermi Ağırlığı	Hız	Kovan Malzemesi	Mermi Malzemesi	Kullanıldığı Bazı Silahlar	Barut
71.12 mm	~ 24g	9.65 - 0.20g	838 ±9.1 m.s ⁻¹	Pirinç (CuZn28 veya CuZn30)	Tombak, Kurşun Çekirdek	G3, FAL, MG3, M60	Küresel Barut

2.3. NIJ 0101.06 standardı

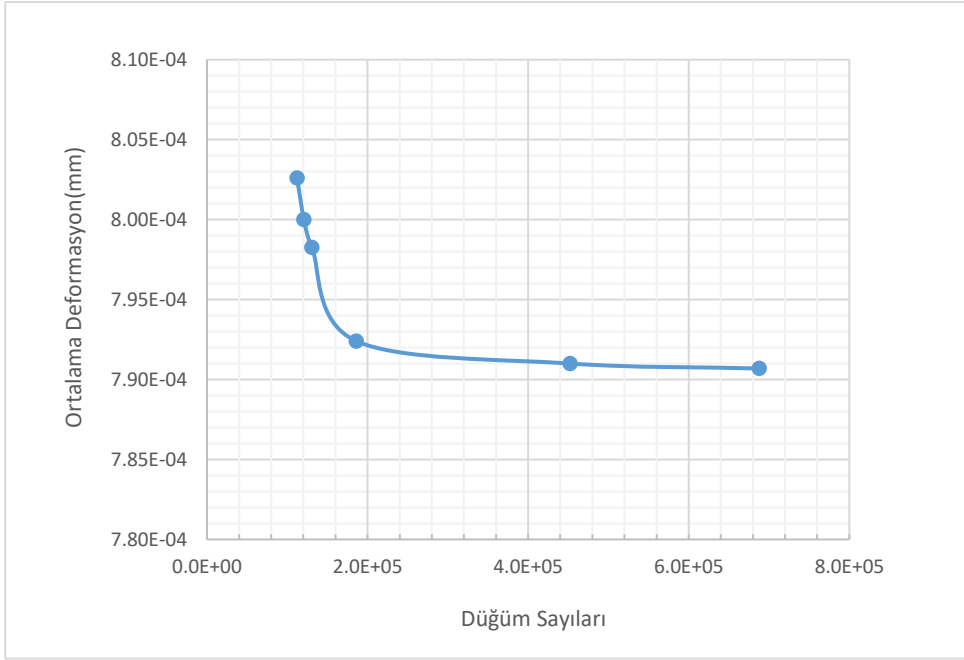
NIJ 0101.06 (National Institute of Justice / Ulusal Adalet Enstitüsü) standart 'Ballistic Resistance of Body Armor' (Vücut Zırhının Balistik Direnci) olarak adlandırılır. Bu standardın amacı, silah ateşine karşı koruma amaçlı kişisel vücut zırhının balistik direnci için minimum performans gerekliliklerini ve test yöntemlerini belirlemektir. Standardın kapsamı yalnızca balistik dirençle sınırlıdır; bu standart, farklı tehdit türleri olan ve NIJ-0115 Kişisel Vücut Zırhının Bıçak Direncinin güncel sürümünde ele alınan bıçaklardan ve keskin uçlu aletlerden kaynaklanan tehditleri ele almaz.

Tablo 9. NIJ 0101.06 Standart Tablosu

Armor Type (Zırh Tipi)	Test Round (Test turu)	Test Bullet (Test Mermisi)	Bullet Mass (Mermi Kütleli)	Conditioned Armor Test Velocity (Şartlandırılmış Zırh Test Hızı)	New Armor Test Velocity (Yeni Zırh Test Hızı)	Hits Per Panel at 0° Angle (0° Açıda Panel Başına Çarpma Sayısı)	Maximum BFS Depth (Maksimum Travma Derinliği)
IIA	1	9 mm FMJ RN	8.0 g (124 gr)	355 m/s (1165 ft/s)	373 m/s (1225 ft/s)	4	44 mm (1.73 in)
II	1	9 mm FMJ RN	8.0 g (124 gr)	355 m/s (1165 ft/s)	398 m/s (1305 ft/s)	4	44 mm (1.73 in)
III	1	7.62 mm NATO FMJ	9.6 g (147 gr)	847 m/s (2790 ft/s)	-	6	44 mm (1.73n)

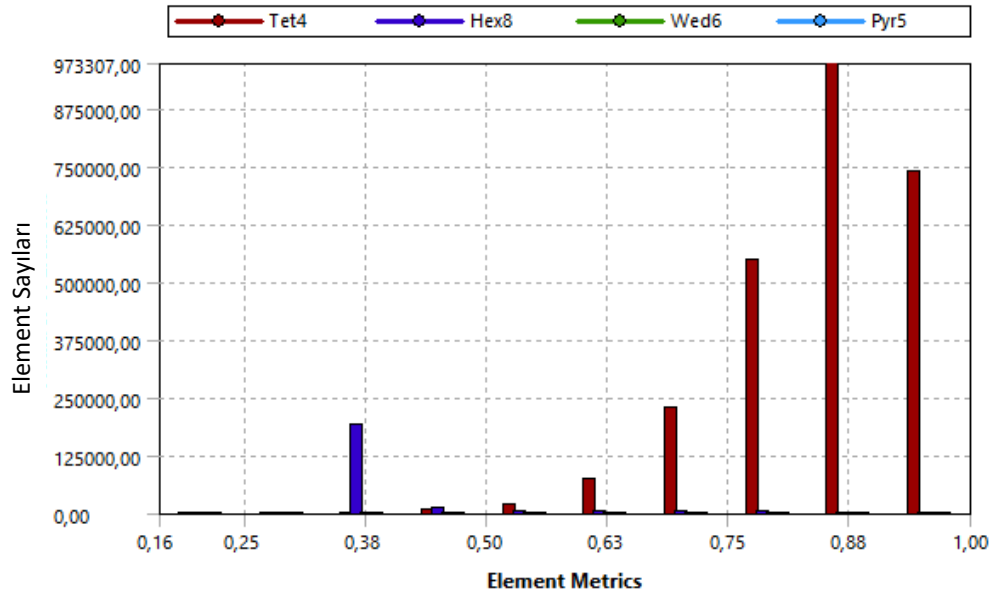
3. Sayısal Çalışma ve Sonuçlar

Sayısal çalışmada, metalik olarak yaygın kullanılan zırh malzemesi Al7075-T651 ile çalışılmıştır. Çalışmada, farklı kalınlıklardaki malzemenin iki farklı mühimmat için tanımlanan hız limitleri altında analizleri yapılmıştır. Belirlenen hız değerleri NIJ (National Institute of Justice) standartlarından NIJ0101.06 (Ballistic Resistance of Body Armor) Vücut Zırhının Balistik Direnci içerisinde tanımlanan hız değerleri ve mühimmatlarından seçilmiştir. Seçilen zırh tipi seviyeleri, mühimmat türleri ve hızları Tablo 9'da gösterilmiştir. Sayısal tanımlamalarda zamana bağlı başlangıç koşulları ve sınır şartları Explicit Dynamics tanımlamaları üzerinden yapılmıştır. Mermi çekirdeği ve çekirdeğin çarpması ile daha fazla deformasyona maruz kalan iç bölge daha yoğun düğüm olacak şekilde tanımlanmıştır. Düğüm sayılarının sonuca etkisi ise bu iç bölge ve mermi çekirdeğindeki düğüm sayıları değiştirilerek doğrulama yapılmıştır. Sayısal analizlerde toplam düğüm ve eleman sayılarına bağlı olarak hedef plaka üzerindeki deformasyondaki değişim Şekil 5.'de verilmiştir. Burada dikkate alınan düğüm sayıları analizdeki toplam düğüm sayıları ve deformasyon değerleri ise hedef plakanın arka yüzeyindeki değerlerdir. Bu yüzeyin seçilme nedeni atış sonrası arka yüzey izinin (BFS) standart içerisinde bu yüzeyin tanımlanmış olmasındandır. Ancak bu çalışmada hedef plaka tekil kullanıldığı için arka yüzey izi ve yumuşak kil üzerindeki derinliğine veya travmaya ilişkin bir değer hesaplanmamıştır. Bu derinliğin hesaplanabilmesi için hedef plaka ile yumuşak arka malzemenin beraber ikil olarak analizlerinin yapılması gerekmektedir.



Şekil 5. Deformasyon Değerlerinin Düğüm Sayıları ile değişimi.

Düğüm sayıları ile deformasyon değerlerinin 12mm kalınlığındaki hedef plaka, 9mm mermi çekirdeği ve 398 m/s hız verileri esas alınmıştır. Şekil 5’de görüldüğü üzere düğüm sayılarının 4,0E+5 civarında sabitlendiği görülmektedir. Hesaplamalar bu düğüm sayıları üzerinde olacak şekilde ızgaralama yapılmış ve sonuçlar bu düğüm sayıları üzerinden alınmıştır. Çalışmada ızgaralamada tek tip düğüm kullanılmamıştır. Geometrinin bazı bölümlerinin düzgün olmayışı buna neden olmuştur. Element tipi için ise Otomatik mesh seçilmiş olup element türlerine ilişkin dağılım Şekil 6..’da gösterilmiştir. Element boyutları ise plakanın dış bölgesi için 2,0E-03mm, iç bölge ve mermi çekirdeği için ise 2,5,0E-04mm tanımlanmıştır.



Şekil 6. Deformasyon Değerlerinin Düğüm Sayıları ile değişimi.

Tablo 10. Analizde tanımlanan mühimmat ve hız değerleri.

Zırh Tipi	Test Mühimmatı (mm)	Nominal Mermi Kütlesi (gr)	Maksimum BFS Derinliği (mm)	Test Hızı (m.s ⁻¹)
IIA	9 mm	8,0 gr	44	373 m/s
II	9 mm	8,0 gr	44	398 m/s
III	7,62 mm	9,6 gr	44	847 m/s

Çalışmada, malzemenin sadece kalınlıkları değiştirilerek belirlenen mühimmatlarla analizler gerçekleştirilmiştir. Analizlerde mühimmatların çekirdekleri gerçek ölçülerinde çizilmiş ve katı modelleri kullanılarak atışlar yapılmıştır. 9 mm ve 7,62 mm mermi çekirdekleri için, analizlerin yapıldığı kalınlık ve çekirdeğe uygulanan başlangıç hız değerleri Tablo 10.'da verilmiştir. Bu tabloda gösterilen deformasyon değerleri, malzemenin arka yüzeyinde kullanılan ve detayları ilgili standartta tanımlanmış yumuşak kil malzemesindeki değerlerdir. Farklı kalınlıklardaki plakalara 9 mm ve 7,62 mm mermilerin çekirdekleri çarpıtıldığında, parça arka yüzeyindeki deformasyon derinlikleri sırasıyla Tablo 11. ve Tablo 12.'de gösterilmiştir. Analiz sonunda saçılmalar mevcut olduğunda ise, ortalama deformasyon değerleri alınmıştır. Deformasyon değeri, zamana bağlı olarak değişim gösterebilmektedir. Hatta çekirdeğin geri sekmesi söz konusu olabileceği için, pozitif yöndeki sonuçlar değerlendirilmeye alınmıştır. 9 mm çekirdek için, mermi çekirdeği deformasyon değerleri Tablo 13.'de verilmiştir. Mühimmat (9mm) çekirdeğinin 6mm kalınlığa sahip plaka içerisindeki zamana bağlı yer değiştirmelerine ilişkin görseller Şekil 7. ve Şekil 8.'de verilmiştir. Ayrıca 12 mm kalınlıktaki parça için 9 mm çekirdeğin iki farklı hız değerinde, hızlarının zamana bağlı değişimleri Şekil 9.'da gösterilmiştir.

Tablo 11. Farklı kalınlıklarda 9 mm mühimmat ile parça deformasyon değerleri

Sıra No	Kalınlık (mm)	Uygulanan Hızlar (m/s)		Sonuç
		373	398	
1	6.0	3.665E-4	3.598E-4	Başarısız
2	8.0	4.777E-4	4.905E-4	Başarısız
3	10.0	4.884E-4	5.264E-4	Başarılı
4	12.0	7.436E-4	8.026E-4	Başarılı

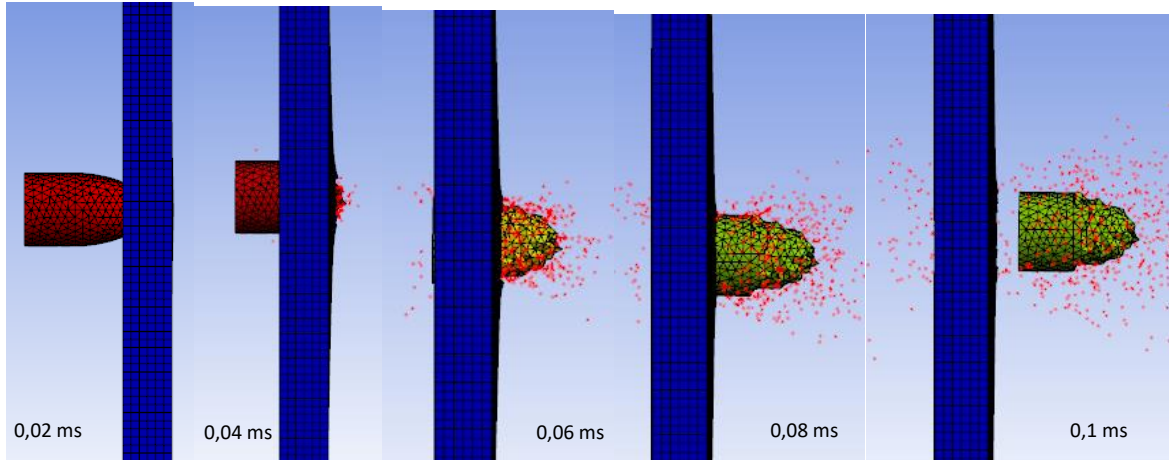
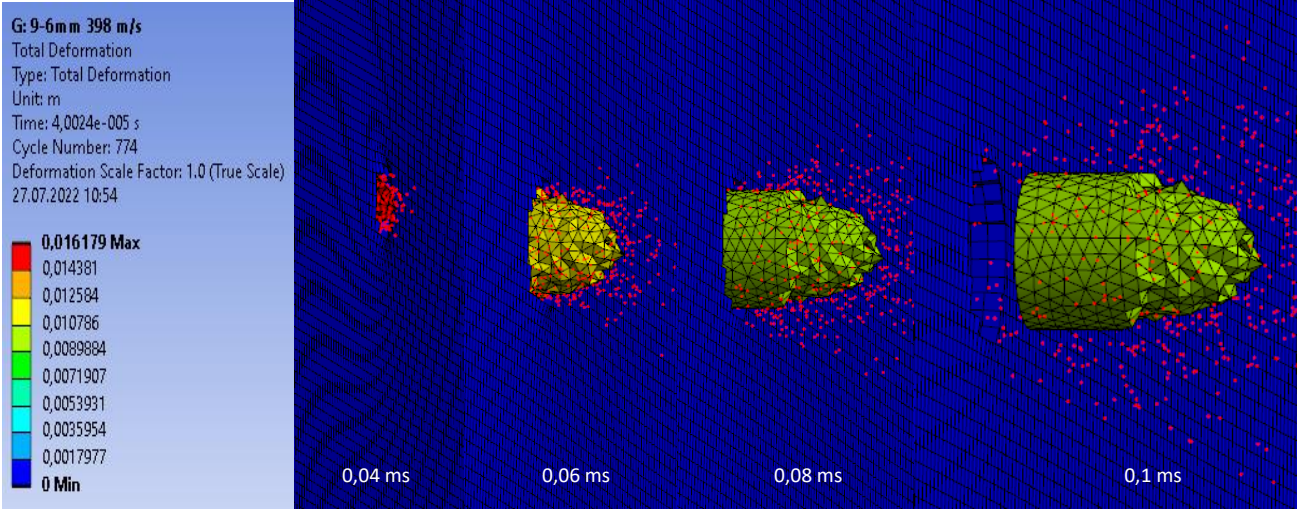
Tablo 12. Farklı kalınlıklarda 7,62 mm mühimmat ile parça deformasyon değerleri

Sıra No	Kalınlık (mm)	Uygulanan Hızlar (m/s)		Sonuç
		847		
1	6.0	1.728E-3		Başarısız
2	8.0	1.283E-3		Başarısız
3	10.0	1.452E-3		Başarısız
4	12.0	7.176E-4		Başarısız

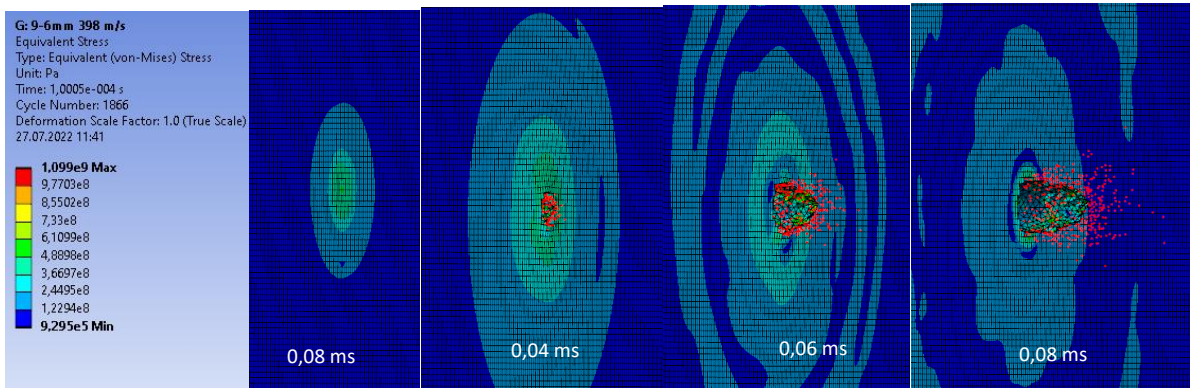
Tablo 13. Farklı kalınlıklarda 9 mm mühimmat çekirdeğinin deformasyon değerleri

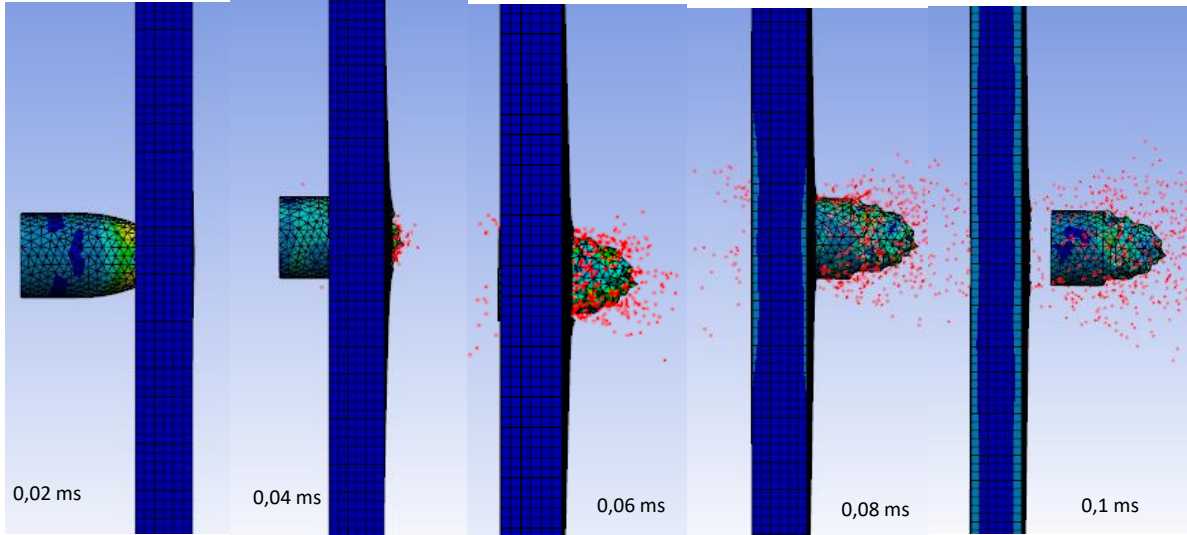
Sıra No	Kalınlık (mm)	Uygulanan Hızlar (m.s ⁻¹)		
		373	398	847
1	6.0	8.79E-02	9.82E-02	4.65E-02

2	8.0	3.69E-04	4.07E-04	4.57E-02
3	10.0	1.77E-02	1.94E-02	4.44E-02
4	12.0	1.57E-02	2.66E-02	4.32E-02



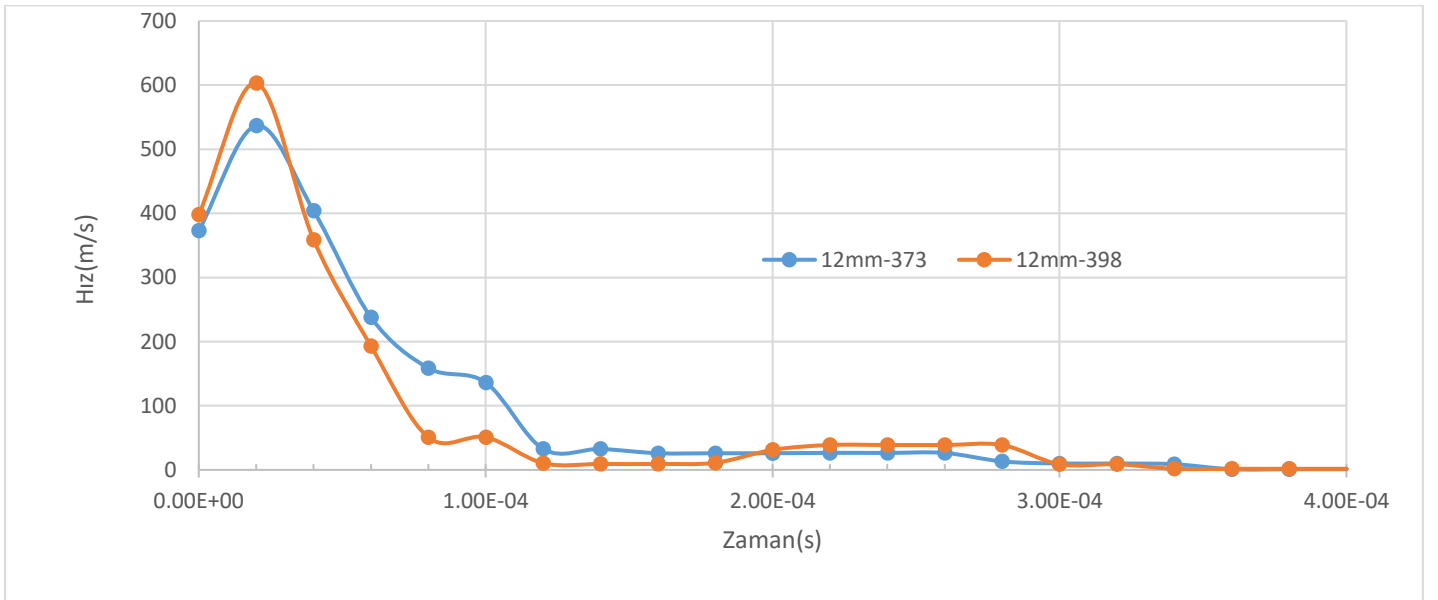
Şekil 7. 9mm mühimmat çekirdeği için zamana bağlı toplam deformasyon değerleri görselleri





Şekil 8. 9mm mühimmat çekirdeği için zamana bağlı gerilme değerleri görselleri

Sayısal çözümlemelerde kullanılan düğüm sayıları; sınırlı tutulmak durumunda olduğu için, sonuçlarda dalgalanmalar görülmektedir. Bazı çözümlerde çekirdek hızlarının sıfıra yaklaşmadığı görülmüştür. Bunun nedeni ise çekirdeğin parçalanarak saçılmasıdır. Şekil 9. delinme olmayan bir kalınlık için; farklı iki başlangıç hızlarında çekirdek hızının değişimini ve bu değişimin parça içerisinde çekirdek kütlelerinin sönümlenmesi sonucunu göstermektedir. Benzer şekilde farklı kalınlıklarda, arka yüzeyde oluşan deformasyon değerlerindeki düzensizliğin kaynağının da düğüm sayıları ile ilişkili olduğu düşünülmektedir.



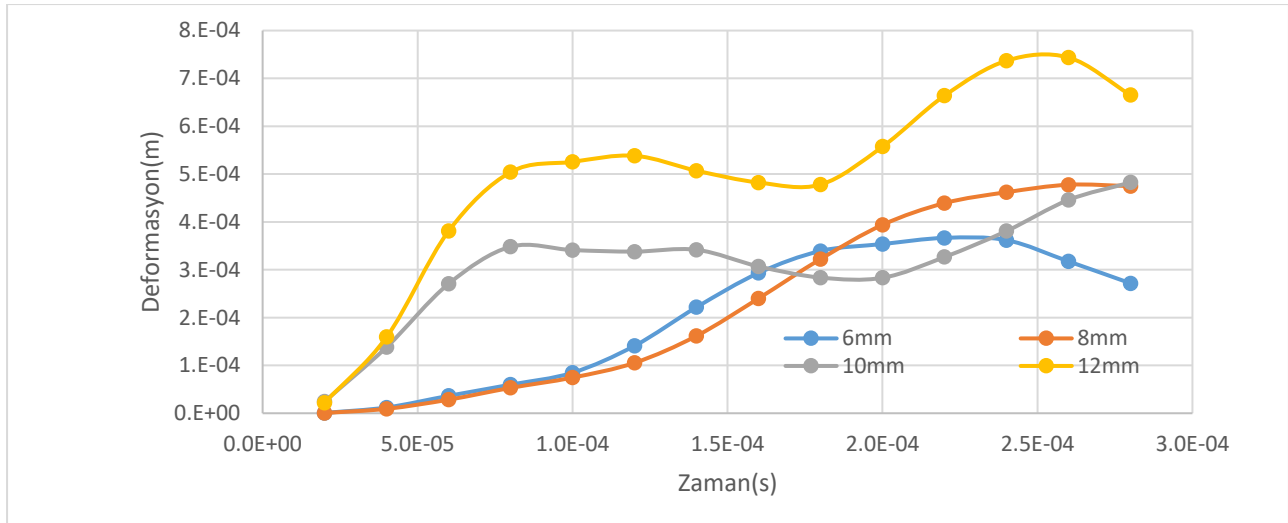
Şekil 9. Mühimmat çekirdeğinin zamana bağlı olarak hız değişimi

Parça üzerindeki enerji değişimleri için kinetik enerji değişimleri Şekil 11., Şekil 12. ve Şekil 13.'de gösterilmiştir. Burada çekirdeğin daha çarpma anında enerjisinin büyük bölümünü bütün kalınlıklar için kaybettiği söylenebilir. Parçanın korumadığı ve delindiği durumda ise, bu enerjinin bir kısmının harcandığı ve çekirdeğin parçayı terk ettiği tespit edilmiştir. Bu durum Şekil 9'da, 6 mm kalınlıktaki parça üzerindeki 9 mm çekirdek için kinetik enerji değişiminden görülebilir. Çekirdeğin parçayı terk ettiği veya parçada kaldığı sürenin bütün kalınlıklar için yaklaşık olarak 1×10^{-4} sn olduğu görülmektedir. Farklı kalınlıklar için 9 mm çekirdek ile yapılan atışlarda, parça üzerindeki deformasyon derinliklerinin zamanla değişimi Şekil 10.'de gösterilmektedir. Bu şekil üzerinde koruma sağlayan 10 mm ve 12 mm'lik plakalarda, grafikteki eğrilerde dalgalanmalar söz konusudur. Bu dalgalanmalar, parçanın basınç etkisiyle oluşan kuvvetleri yenmesi ve geri tepmelerin oluşması nedeniyledir. Ancak 6 mm ve 8 mm plakalarda delinme gerçekleştiği için bu dalgalanmalar görülmemektedir. Literatürde Özşahin (2008)'in çalışmalarından elde edilen performans verileri de kıyaslama

olması açısından Tablo 14. de sunulmuştur. Bu çalışmaya en yakın kalınlık 6mm plaka için arka malzeme deformasyon değeri 377 m/s hız için 0,3665mm ve 398 m/s hız için ise 0,3598mm deformasyon bulunmuştur. Malzemelerin bu hızlarda delinip delinmemesi durumundaki deformasyon değerleri ciddi farklar oluşturacağı açıktır. Özşahin (2008) çalışmasında parçaların delinmediği ve bu değerlerin şişme değerleri olduğu anlaşılmaktadır. Bu çalışma kapsamındaki sayısal hesaplamalarda 6mm kalınlığındaki plaka delindiği için deformasyon değerlerinin farklılığının bundan kaynaklandığı açıktır.

Tablo 14. Kalınlığı 6,35mm olan AA 7075-T6 malzeme farklı hızlardaki deformasyon değerleri(Özşahin (2008))

Test no	Hız	Çökme (mm)
V-1	352	1.07
V-5	361	1.63
V-3	370	2.03
V-4	377	2.40
V-2	393	2.86



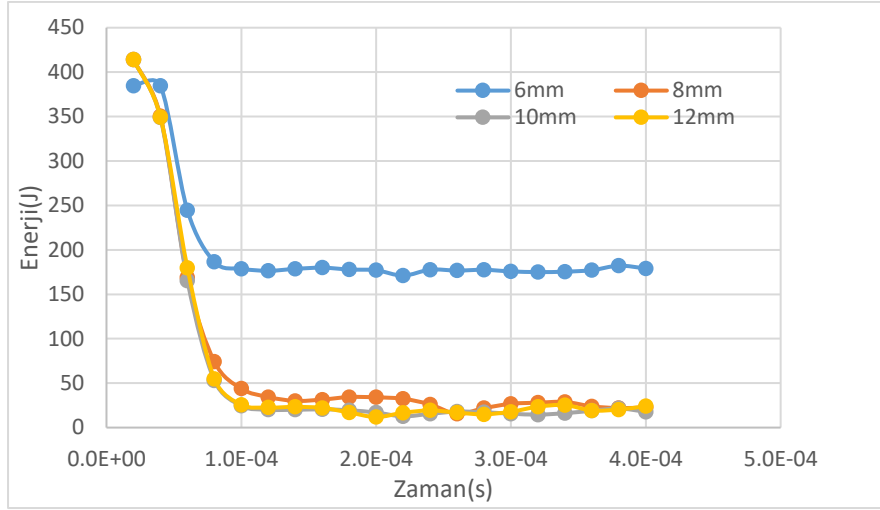
Şekil 10. Farklı kalınlıklardaki plakada Deformasyon Değerlerinin Zamanla Değişimleri (9mm mermi çekirdeği ile).

Enerjinin korunumu ilkesi dinamik analizin önemli bir kalite ölçüsüdür. Programdaki bu korunum ifadesindeki hata değerinin yüksek seçilmesi, analizde sapma değerine karşılık gelmektedir. Varsayım olarak %10 hata değerinin üstüne çıkılan durumlarda programın sonlanması sağlanmaktadır. Bu durum analizde çok hatalı sonuç vermesini sınırlandıran bir tanımlama değildir. Analizde bu değer 0.1 olarak tanımlanmıştır. Hata değerinin hesaplanmasında Eşitlik (1) kullanılmaktadır. Burada He (Enerji Hatası), Me (Anlık Enerji), Re (Referans Enerji), W(Yapılan İş) ve Ke(Kinetik Enerji) değerlerini göstermektedir.

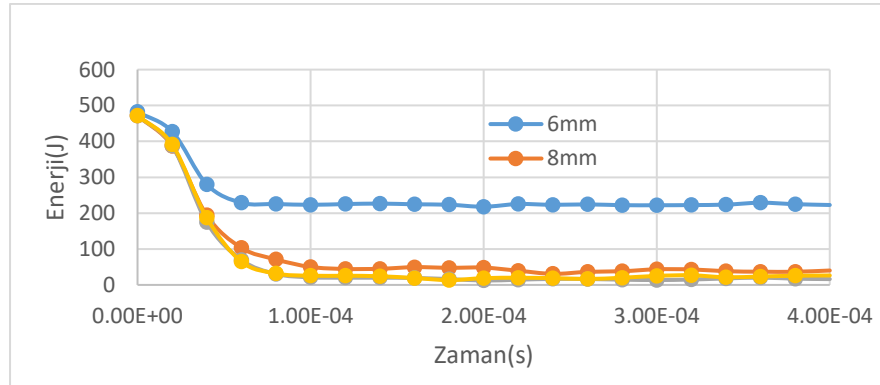
$$He = \frac{Me - Re - W}{\max(|Me|, |Re|, |Ke|)} \quad (7)$$

Çalışmada "On Geometric Strain Limit" seçeneği evet olarak işaretlenmiştir. Bu seçenek, geometrik gerinim değerinin belirtilen sınırı aştığında aşınmaya izin vermesini sağlamaktadır. Limiti aşarsa elemanlar otomatik olarak aşınmaktadır. Bu değer 0.75 ile 3.0 arasında bir değer olup varsayılan değer ise 1.5 olarak tanımlanmıştır. Element üzerinde aşırı deformasyon değerlerine ulaşıldığında bu seçenek çalışmaktadır. Düğümlerin elemanın geri kalanından anormal bir uzaklıkta yer değiştirmesini veya ağır deformasyon nedeniyle çözümün durmasını önlemektedir. Bir diğer önemli tanımlama ise "Erosion" tanımlamasıdır. Bu tanımlama da elementlerin ayrılmasına

ilişkin tanımlamalar olan maksimum gerilme, minimum zaman adımı ve malzeme kaynaklı kriterlerin devreye girmesini sağlamaktadır. Enerji değişimlerinde parça kalınlığının 8 mm olduğu durumun sınıra çok yakın ve kritik kalınlık civarında olduğu Şekil 7.'de görülmektedir. 10 mm ve 12 mm olan diğer iki kalınlık ise mermi çekirdeğini söndürmüştür. Enerjinin neredeyse tamamı, diğer enerji türlerine dönüşmüş ve hareketin durduğu gözlemlenmiştir. 6 mm kalınlığındaki parçanın ise, sahip olduğu enerjinin yaklaşık olarak yarısı kaybedilerek parçadan ayrıldığı sonucuna varılmıştır.

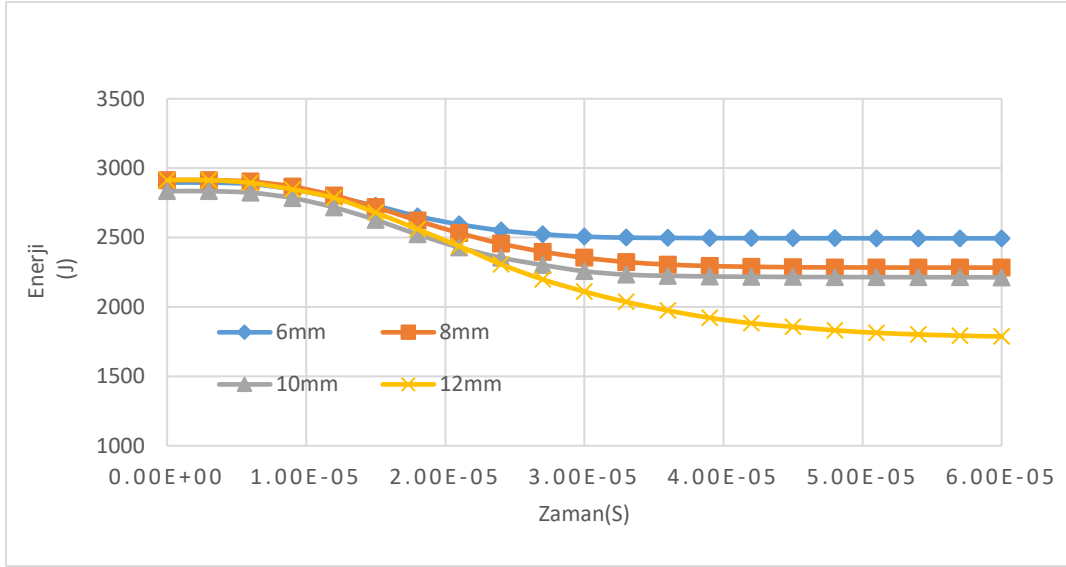


Şekil 11. Farklı kalınlıklardaki Plakada Kinetik Enerjinin Zamanla Değişimleri (9 mm mermi çekirdeği, 373 m.s⁻¹)

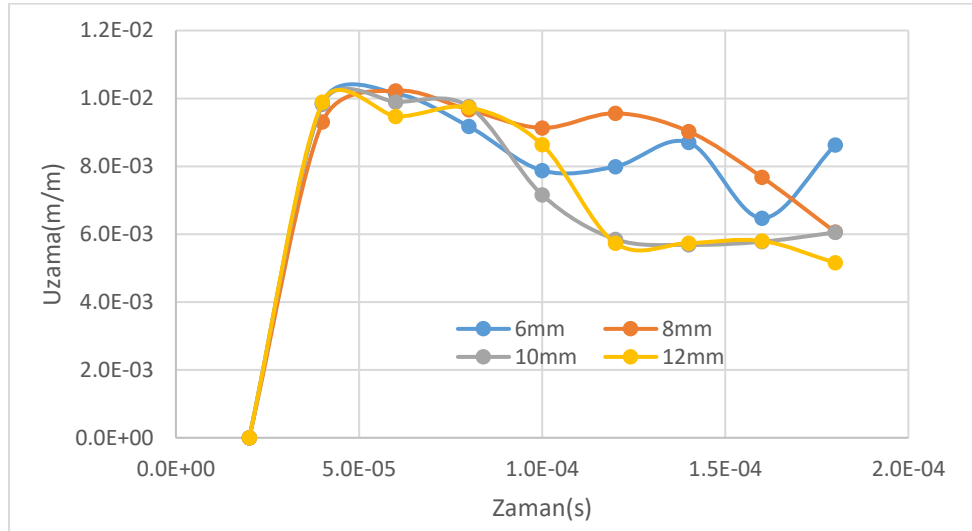


Şekil 12. Farklı Kalınlıklardaki Plakada Kinetik Enerjinin Zamanla Değişimleri (9 mm mermi çekirdeği, 398 m.s⁻¹)

Parça kalınlıkları aynı kalarak (6 mm, 8 mm, 10 mm ve 12 mm) 7.62 mm mühimmat çekirdeği ile yapılan sayısal çözümlerlerde benzer sonuçların elde edildiği görülmektedir. Ancak bu mühimmat hızı (847 m.s⁻¹) yüksek olduğu için, bütün parçaların koruma sağlayamadığı Şekil 9.'da görülmektedir. Bu durum çekirdeklerin enerji değişimlerine bakılarak anlaşılmaktadır. Değişimlerin düzgün dağılımlı olması ise, parçanın çekirdeğinin oluşturduğu basınç ve buna bağlı oluşan kuvveti yenememesi nedeniyle. Çekirdeğin geri tepme zamanı görülmeden, parçadan ayrıldığı gözlemlenmiştir.

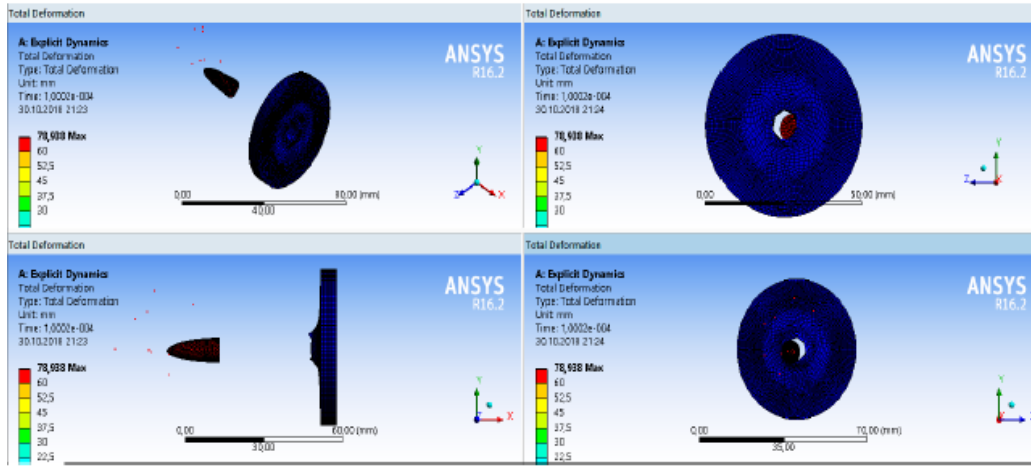


Şekil 13. Farklı Kalınlıklardaki Plakada Kinetik Enerjinin Zamanla Değişimleri (7.62 mm mühimmat, 847 m.s⁻¹)



Şekil 14. Farklı Kalınlıklardaki Plakada Zamana Bağlı Elastik Uzama Değerleri (9mm mühimmat, 373 m.s⁻¹)

Parçaların uzama değerlerine bakıldığında, düşük kalınlıklı parçalarda küçük dalgalanmaların olduğu görülmektedir. Bunun nedeninin ise, çekirdeğin parçayı diğer kalınlıklara göre erken terk etmesi ve parça yüzeylerinde bir dalgalanmanın oluşmasına neden olduğu düşünülmektedir. Bu durum eğrilerin 6 mm ve 8 mm için, yaklaşık aynı zaman ($1.0E^{-4} - 1.0E^{-5}$) aralığında dönüşler gösterdiği Şekil 14.'de gösterilmiştir. Zaman değeri değiştirilerek, alınan sonuçların da değişeceği göz ardı edilmemelidir.



Şekil 15. AA 7075 Alüminyum Alaşım Hedef Plaka ile Mermi Etkileşimi

Parçanın koruma sağlamadığı bir durum için mermi çekirdeğinin parçayı terk ettiği ve parçadaki deformasyon görselleri Şekil. 15.'de verilmiştir. Parça üzerinde çekirdeğin çıkış bölgesinde saçılmaların fazla olduğu ve bu durumun sayısal parametre tanımlamalarından ve düğüm sayılarındaki sınırlamalardan kaynaklandığı anlaşılmaktadır.

- 9mm mühimmat çekirdeği için plaka kalınlıklarının 6mm ve 8mm için koruma sağlayamadığı buna karşılık 10 mm ve 12mm kalınlıklar için koruma sağladığı görülmüştür.
- 7.62 mm mühimmat ve 847m/s hızlarda bütün kalınlıkların koruma sağlamıştır.
- 9mm mühimmat için iki farklı hız söz konusu olduğundan çekirdek deformasyonlarının bu hızlara bağlı olarak yüksek hızda çekirdeğin daha fazla deformasyona uğradığı, benzer durumda 7.62 mm mühimmat çok daha yüksek hızda sahip olmasına rağmen aynı kalınlıklardaki plakalarda deformasyon değerleri 9mm'ye göre daha düşük çıkmış olması yüksek hız ve çekirdek geometrisinden kaynaklanmaktadır.
- Elde edilen sonuçların deneysel sonuçlarla karşılaştırılması ve sonuçların ne düzeyde yaklaştığının gösterilmesi önemlidir. Ancak literatürde AA 7075 üzerine yapılan balistik çalışmaların bir çoğu kompozit olarak gerçekleştirilmiştir. Bunun yanında çalışmaların bir çoğunun balistik limit değerler üzerine yapıldığı ve NIJ standartlarını esas alan çalışmaların az olduğu ve karşılaştırılabilir olmadığı görülmektedir (Rahman N. A. ve diğ. 2016, Rodríguez-Millán M. ve diğ. 2014).
- Özşahin E. ve diğ. (2011), farklı iki kalınlıktaki (6,35mm ve 8,0mm) Al 6061 T651 plaka için 9mm mühimmat kullanarak yaptıkları çalışmada 8mm kalınlığındaki plakanın koruma sağladığı ve 6mm kalınlığındaki plakanın koruma sağlayamadığı görülmüştür. Bu çalışmada ise her iki kalınlıktaki (6mm ve 8mm) plakanın da koruma sağlamadığı görülmektedir.
- Suresh Kumar Sundaram, Bharath A. G. & Aravind B. (2020) çalışmalarında Al 6061-T6 ve Al 7075-T6 plakalara tekli ve çoklu mühimmat ile atış gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmada kullanılan mühimmat 7,62mm (APP) olup çekirdek hızları ise 330 ile 450 m/s arasında belirlenmiş, deformasyon derinlikleri 433.3m/s çekirdek hızında hedef plakanın arka yüzeyinde bulunan Al 1100 plaka ile ölçülmüştür. Bu çalışma hesaplanan deformasyon değerleri ise doğrudan plaka arka yüzeyindeki yer değiştirmelerinin sayısal ortalaması alınarak belirlenmiştir. Suresh Kumar Sundaram, Bharath A. G. & Aravind B. (2020) tarafından yapılan çalışmada 6mm kalınlığındaki yalın Al 7075-T6 plakanın delinmediği ve koruma sağladığı belirtilmektedir. Plaka kalınlığının düşürülmesi ile (3mm) delinmenin gerçekleştiği ifade edilmektedir. Hatta bu çalışmada NIJ standardından farklı olarak ilk hız değerinin 330 ile 450 m/s alınması ancak NIJ standardında Seviye III ve 7,62x51 mm mühimmat için hız değerinin 847 m/s olarak verildiği dünüldüğünde çalışmanın ilgili standarttan bağımsız olduğu görülmektedir.
- Çalışma sonuçları, literatürde incelenen bir birçok çalışmada hızların NIJ standardındaki değerlerden farklı olması, malzeme kalınlıklarının uyumsuzluğu, çoğu çalışmada hedef plakaların kompozit olarak oluşturulması ve malzeme kalınlıklarının uyumsuzluğu, mühimmatların ve dolayısıyla çekirdek malzemelerinin değişken olması gibi birçok nedenden dolayı sonuçlar doğrudan karşılaştırılabilir olarak sunulamamıştır.

Bilgilendirme

Bu çalışma mühendislik bilimleri araştırma ve geliştirme uygulamaları özel sayısı çağırısı kapsamında değerlendirilmiştir.

Referanslar

Allison, J.E., & Cole, G.S. (1993). Metal matrix composites in the automotive industries. JOM, 45,19-24,

Ansys 2021/R2, Ansys Explicit Dynamics Analysis Guide, July 2021.

Arslan, K., & Güneş, R. (2017). Ballistic Impact Simulation of Ceramic/Metal Armor Structures. International Journal of Engineering Research and Development, 9(3),12-20. doi.org/10.29137/umagd.371100.

Baradeswaran, A., Elaya Perumal, A. (2013). Influence of B₄C on The Tribological And Mechanical Properties of Al 7075–B₄C composites. Composites B, 54, 146-152 <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.05.012>.

Baydaroglu, V. (2018). Balistik malzeme üretimine yönelik B₄C+SiC takviyeli Al 7075 kompozitlerde optimum katkı oranının belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Kırıkkale Üniversitesi, Kırıkkale, TÜRKİYE.

Chen, P.,& Hoshi, T. (1992). High-Performance machining of SiC Whisker-Reinforced Aluminum Composite by Self-Propelled rotary tools. CIRP Annals, 41(1), 59-62. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)61152-4](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)61152-4).

Clyne, T.W., Withers, P.J. (1993). An introduction to metal matrix composites. Cambridge Solid State Science Series, ISBN: 0521418089, Cambridge University Press. https://books.google.com.tr/books?printsec=frontcover&vid=LCCN92024679&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false.

National Institute of Justice, NIJ Standard-0101.06 Ballistic Resistance of Body Armor, www.ojp.usdoj.gov/nij, July 2008.

İlhak, B. (2019). Tungsten Alaşımli Kinetik Enerjili Mühimmatın Bor Karpit Takviyeli 4340 Çelik Plakalar Üzerindeki Balistik Etkisinin Sayısal İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Giresun Üniversitesi,Giresun, TÜRKİYE.

Lopez-Puente, J., Arias, A., Zaera, R.,& Navarro, C. (2005). The effect of the thickness of the adhesive layer on the ballistic limit of ceramic/metal armours. An experimental and numerical study. International Journal of Impact Engineering, 32(1-4), 321-336. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2005.07.014>.

Ma, Y.W., Li, Y.B.,& Lin, Z.Q.(2019). Joint formation and mechanical performance of friction self-piercing riveted aluminum alloy AA7075-T6 joints. Journal of manufacturing Science and Engineering, 141(041005), 1-11.

[https://urunler.mke.gov.tr/Urunler/7.62-mm-x-51-\(Normal\)/30/259](https://urunler.mke.gov.tr/Urunler/7.62-mm-x-51-(Normal)/30/259).

Özşahin, E. (2008). Alüminyum levhaların yüksek hızlı çarpma yükleri altındaki davranışları, Doktora tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, TÜRKİYE.

Ramnath, B. V., Elanchezian, C., Annamalai, RM., Aravind, S., Atreya, T. S. A., Vignesh, V., Subramanian C. (2014). Aluminium metal matrix Composites- a review. Rev. Adv. Mater. Sci., 38, 55-60.

Schneider, Y., Soppa, E., Kohler, C., Mokso, R., Roos, E. (2011). Numerical and experimental investigations of the global and local behaviour of an Al(6061)/Al₂O₃ metal matrix composite under low cycle fatigue. Procedia Engineering, 10, 1515-1520.

Suresh, S., Mortensen, A, Needleman A. (1993). Fundamentals of Metal Matrix composites. Boston, Butterworth- Heinemann.

Zhirafar, S., Rezaeian, A.,& Pugh,M. (2007). Effect of Cryogenic Treatment on the mechanical properties of 4340 steel. Journal of Materials Processing Technology, 186, 298-303. doi:10.1016/j.jmatprotec.2006.12.046.

Kılıç, N., Tansel D. ve Yıldırım O. (2010), Balistik penetrasyon benzetimlerinde Johnson-Cook malzeme modeli sabitlerinin etkisinin incelenmesi, SAVTEK 2010 Savunma Teknolojileri Kongresi, Vol.1, Ankara/Turkey.

Ansyes Explicit Dynamics Anaysis Guide (2021), Ansys 2021 R2, Ansys Inc., ansysinfo@ansys.com, <http://www.ansys.com> .

Yeter E.(2019), “investigation of ballistic impact response of aluminum alloys hybridized with kevlar/epoxy composites”, Politeknik Dergisi, 22(1): 219-227, Issn: 1302-0900 (Print), Issn: 2147-9429 (Online).

Rahman N. A., Abdullah S., Zamri W.F. H., Abdullah M. F., Omar M. Z. And Sajuri Z.(2016). Ballistic Limit of High-Strength Steel and Al7075-T6 Multi-Layered Plates Under 7.62-mm Armour Piercing Projectile Impact,nLatin American Journal of Solids and Structures (13),1658-1676,www.lajss.org.

Rodríguez-Millán, M., Vaz-Romero, A., Rusinek, A., Rodríguez- Martínez, J. A. y Arias, A. (2014). Experimental Study on the Perforation Process of 5754-H111 and 6082-T6 Aluminium Plates Subjected to Normal Impact by Conical, Hemispherical and Blunt Projectiles. *Experimental Mechanics*, 54, pp. 729–742.

Kurtuluş T.(20219), Çok Katmanli Kompozit Zirh Malzemesi Üretimi Ve Balistik Özelliklerinin İncelenmesi, Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.Yüksek Lisans tezi.

Andersen, C. and Dannemann, K. (2001). Deformation and damage of two aluminum alloys from ballistic impact, Proceedings of the 12th Biennial International Conference of the APS Topical Group on Shock Compression of Condensed Matter, Atlanta, June 24–9.

Özşahin E., Diltemiz F., Tolun S.(2011), Characterization of 6061 T651 Aluminum Plates Subjected To High-Velocity Impact Loads, Applied Sciences and Engineering Cilt/Vol.:12-Sayı/No: 1 : 65-74.

Suresh Kumar Sundaram, Bharath A. G. & Aravind B. (2020): Influence of target dynamics and number of impacts on ballistic performance of 6061-T6 and 7075- T6 aluminum alloy targets, Mechanics Based Design of Structures and Machines, DOI: 10.1080/15397734.2020.1738245.