



## Farklı Açılarda Alümina Seramiğe Çarpan Mermi Hasarının İncelenmesi

### Investigation of Bullet Damage to Alumina Ceramic at Different Angles

Alemdar Ongun<sup>1</sup> , Ömer Resuloğlu<sup>1</sup> 

<sup>1</sup>Kırıkkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü, 71451, Kırıkkale, Türkiye

**Başvuru/Received:** 19/04/2023

**Kabul/Accepted:** 21/06/2023

**Çevrimiçi Basım/Published Online:** 10/07/2023

**Son Versiyon/Final Version:** 14/07/2023

#### Öz

Yapılan bu çalışma, savunma sanayinde uygun maliyetiyle sıklıkla tercih edilen alümina seramiklerin, mermi çarpması sonrası hasar durumunu incelemek amacıyla yapılmıştır. Alümina seramikler sert (1600 HV) yapıları sebebiyle zırhların ön kısımlarında mermi darbesini ilk olarak karşılayan ve bu darbeyi mermi ucundaki sivri kısmı kırarak, direnç göstererek mermi uç kısmını geometrik olarak mantarlaştırarak, daha geniş bir alana yayması sağlamaktadır. Sayısal analizlerde 7,62x51 mm (M80) mermi olarak modellenerek, standartlarına uygun olarak 23,7 metrede ulaştığı hız olan 838 m/sn hız referans alınmıştır. Yapılan analizlerin sonuçlarında hem mermide hem de seramikte oluşan hasar durumları incelenmiştir.

#### Anahtar Kelimeler

*“Alümina Seramik, Terminal Balistik, Mermi Hasarı, Çarpma Açısı”*

#### Abstract

Alumina ceramics are often preferred in the defense industry at affordable costs. In this study, alumina ceramics were made to investigate the damage status after projectile impact. Alumina ceramics, known for their hard structure (1600 HV), first respond to the bullet impact on the front of the armors. After impacting, the ceramic breaks the piercing part of the bullet tip, showing resistance and geometrically mushrooms the bullet tip, allowing the effect to spread over a larger area. In numerical analysis, it was modeled as 7.62x51 mm (M80) bullet and 838 m/sec speed, which was reached in 23.7 meters in accordance with its standards, was taken as reference. As a result of the analyzes, the damage cases in both bullets and ceramics were examined and compared.

#### Key Words

*“Alumina Ceramic, Terminal Ballistic, Bullet Damage, Impact Angle”*

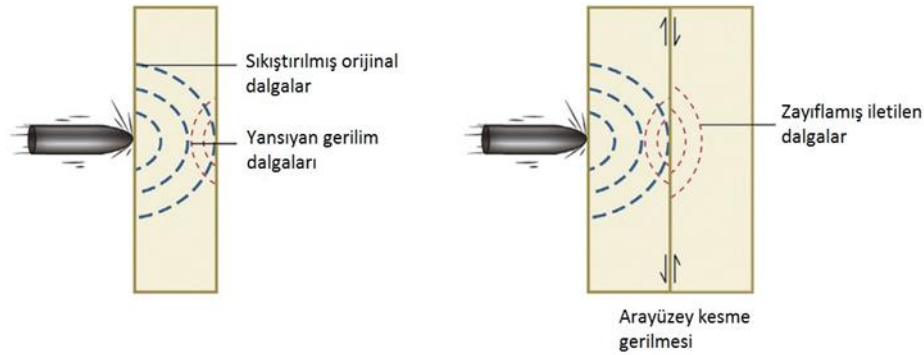
## 1- Giriş

Zırh olarak bilinen balistik hasarı önleme sistemleri , mühendislik anlamında ilkel çağlarda kalkanla başlayıp zamanla tehdidi önceden algılayarak, önleyebilen kompleks sistemlere dönüşmüştür. Saldırı sistemlerinin teknolojiyle gelişmesiyle beraber, tehditler sürekli gelişmekte ve değişmektedir, buna bağlı olarak savunma teknolojisinde zırh sistemleri devamlı olarak revize edilmekte, iyileştirilmektedir. Bu ihtiyaç doğal arz-talep dengesinden gelmektedir. Tam tersi olarak da savunma geliştikçe, bu savunmayı geçecek saldırı, tahrip mekanizmaları gelişmektedir. Bu doğal dengede zırh ve anti-zırh teknolojileri birlikte, devamlı olarak gelişmektedir. Sürekli gelişen bu sistemler için kullanılan deneyler genelde tahribatlı testler olduğundan dolayı, maali güç ve zaman gerektirmektedir. Bu maliyetli ve zaman alan tahribatlı testleri minimumda tutabilmek adına analitik ve sayısal çalışmalar önem kazanmaktadır.

“Balistique” Fransızca kökenli olup, mermilerin namlu içinde ve dışında hareketlerini ve hedef üzerindeki hasarlarını araştıran bir bilim dalıdır. Balistik atış bilimi olarak da adlandırılmaktadır. Balistik, mermi ve füzelerin hareketlerini analiz eder ve dört farklı kategoride incelenir.

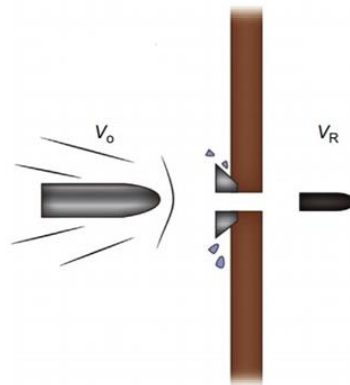
- İç Balistik: Mermi veya füzenin namluda veya uygulanan konumdaki hareketini araştırır. Bir bakıma mermiye uygulanan itme kuvvetini inceler. Mermi, namludan harekete başladığı zamandan, namlu çıkışına kadar olan süreci kapsar. (Army, 1965),
- Geçici Balistik: Ara balistik olarak da bilinen kategoridir (Encyclopædia Britannica, 2017), mermi silahtan çıktıktan sonra arka kısımdaki basınç dengelendiği noktaya kadar olan süreci irdeler. (Gable, Hurley ve Chojnicki, 2007),
- Dış Balistik: Uçuş sırasında mermi veya füzenin hareketini inceleyen kısımdır.
- Terminal Balistik: Merminin hedef üzerindeki etkilerini ve tepkilerini araştırır, analiz eder. (Zook, Frank ve Silsby, 1992).

"Terminal balistik", mermi ile merminin çarptığı bölge arasındaki deformasyonu araştıran balistik biliminin bir alt dalıdır. Terminal balistik, yapılar, tanklar, zırhlar vb. gibi çeşitli nesnelere oluşan darbe etkilerini, kinetik enerji çevrimlerini, kimyasal enerji çevrimlerini ve patlayıcı etkileri inceleyen bir bilim dalıdır. Şekil 1'de gösterildiği gibi, mermi hedefe çarptığında parçacıklar arasında stres dalgaları oluşur. Bu oluşan dalgalar, elastik, plastik veya dalga şeklinde olabilir, seviyeleriyle ilgilidir.



Şekil 1. a) Stres Dalgalarının Oluşması b) Ara Yüzeyde Oluşan Makaslama Etkisi (Crouch, 2016)

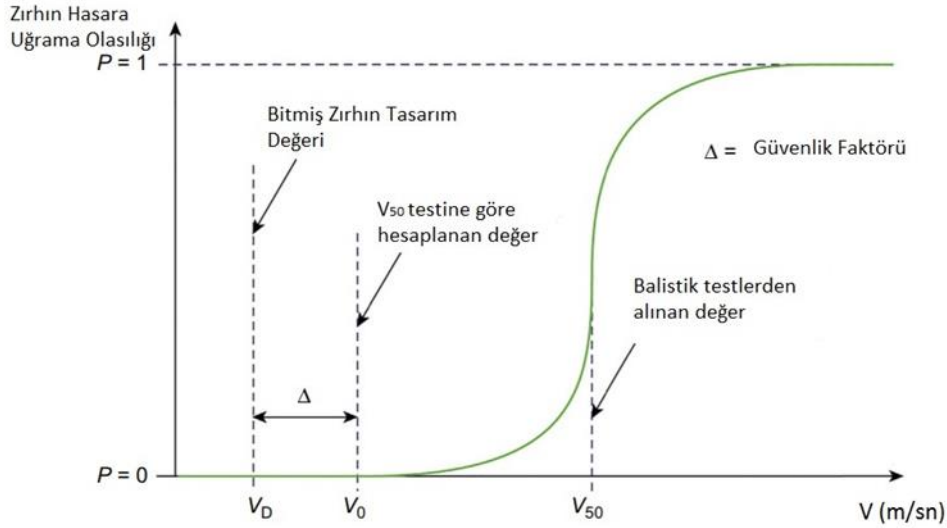
Mermilerin zırh üzerindeki etkilerini anlamak ve zırhın enerjii ne kadar absorbe edebildiğini, mermiye ne kadar hasar verdiğini ve merminin enerji dağılımını ne ölçüde gerçekleştirdiğini anlamak, balistik için araştırılması gereken bir konudur. Bu nedenle, mermilerin balistik zırh üzerinde yarattığı deformasyon mekanizmalarını 8 farklı kategoride değerlendirilebilir. Sünek malzeme delik oluşumu, tıkama şeklinde hasar oluşumu, delaminasyon, tabaka ayrılma, konik kırılma, parçalanma, radyal kırılma ve çevresel çatlaklar olarak inceleyebiliriz.



Şekil 2. Tek Plaka Basit Zırh Sistemi

Mühendislik açısından değerlendirdiğimizde, delinmeyen veya korunan bir malzeme sistemi tasarlamak için analizler ve testler kesinlikle gereklidir. Şekil 2'de gösterilen basit bir sistem, tek bir çelik tabakadan oluşur. Zırhın işlevini yerine getirebilmesi için

kabul gören dört özellik incelenir: çeliğin kalitesi, çeliğin kalınlığı, plakanın eğimi ve mermi hızı. Şekil 3'te mermi çarpma hızına bağlı olarak zırhın delinme olasılığını gösteren bir grafik bulunmaktadır. Grafikte önemli bir nokta olan V<sub>50</sub>, yapılan deneylerde zırhlarda %50 delinme oranının görüldüğü hızı ifade eder.



Şekil 3. Çarpma Hızına Bağlı, Delinme İhtimalinin Şematik Gösterimi

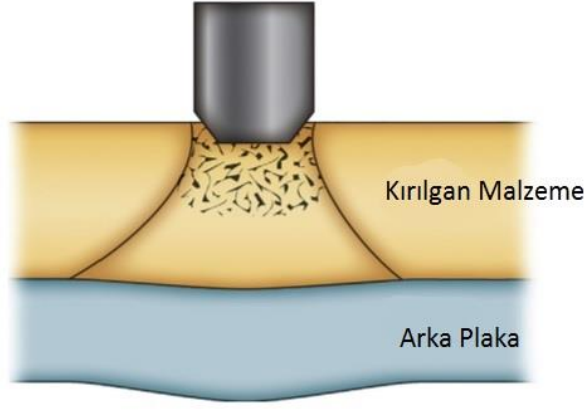
V<sub>0</sub> çarpma hızında, yapılan deneyler ve analizler zırhta herhangi bir delinme gözlenmediği için güvenli bölge olarak kabul edilir. Bununla birlikte, mühendisler güvenliği garanti altına almak için V<sub>D</sub> hızını tehdit olarak kabul eder ve tasarımlarını bu hızla göre yapmak için güvenlik faktörünü (Δ) eklerler. P değeri, zırhın hasar almasını gösterir. Örneğin, P değeri 1 ise tamamen hasar anlamına gelir. Saha koşullarında mermi/füze açılı bir şekilde tahribe yol açabilir veya kullanılan balistik zırh mermiye karşı belirli bir açıda olabilir. Ancak, en kötü senaryoyu uygulamak, yani merminin dik bir şekilde zırha çarptığı durumu dikkate almak önemlidir. Ayrıca, malzeme kusurlarından kaynaklanan gri bölge adı verilen bir bölge mevcuttur, bu bölge hasarın meydana geldiği bölgeyi gösterir. Tek katmanlı yapılar, basit çelik katmanlı sistemlere kıyasla 5m/s'ye kadar küçük farklar oluşturabilirken, karmaşık katmanlı sistemlerde (kompozit yapılar) 50m/s hızla kadar olumsuz etkiler oluşabilir. Seramik yapıların mikro yapısında olan boşluklar/düzensizlikler buna bir örnek olarak gösterilebilir. Literatürde metallerin davranışını inceleyen genel modelin Johnson-Cook modeli olduğu görülmüştür (Johnson ve Cook, 1985).

Seramik malzemeler, balistik zırhlarda önemli bir rol oynar ve balistik tehditlere karşı koruma sağlamak için temel bir malzeme olarak kullanılır. Seramiklerin balistik zırhlarda önemli olmasının başlıca sebepleri şunlardır: yüksek sertlik, çoklu mermi atışına dayanıklılık, termal ve korozyon direnci. Sertlik, seramiklerin en belirgin özelliğidir. Bor karbür, silisyum karbür ve alümina gibi seramik malzemeler, olağanüstü sertlik özelliklerine sahip malzemelerdir. Bu özellik, mermilerin keskin ve rijit yapısını etkisiz hale getirir ve zırhın etkin bir şekilde kullanılabilmesini sağlar. Seramik zırha çarpan mermi, yüksek sertlik özelliği sayesinde kinetik enerjiyi dağıtarak ve emerek delme derinliğini azaltır. Seramik malzemeler yüksek sertlik, hafif yapı, çoklu vuruş kabiliyeti ve termal-kimyasal tehditlere karşı direnç gibi özellikleri bir araya getirerek etkili balistik zırhların geliştirilmesinde kritik bileşenlerdir. Seramikler, balistik tehditlere karşı güvenilir koruma sağlarken, geleneksel zırhlara kıyasla hafif yapısıyla kullanıcının hareket kabiliyetini artırır ve kullanım kolaylığı sunar.

## 2- Seramik Malzeme Hasarı

Mermilerin balistik olarak verdiği hasar türlerinin anlaşılması balistik olarak inceleme yapmak adına hassas bir konuma sahiptir. Merminin kinetik enerjisinin ne kadarının absorbe edildiğini belirleyebilmek, mermiyi ne kadar tahribata uğrattığını tespit etmek bakımından hayati öneme sahiptir. Bu nedenle mermilerin balistik plakalarda meydana getirdiği tahrip türleri genel olarak altı başlıkta irdelenebilir. Bunlar sünek malzeme delik oluşumu, tıkama şeklinde hasar oluşumu, tabaka ayrılma, konik kırılma, parçalanma ve çevresel çatlaklardır. Bu makalede incelenen seramikte deneylerde ve diğer makalelerde görülen parçalanma şeklinde hasar oluşmaktadır. Normalde ölçü olarak büyük seramiklerde ek olarak çevresel çatlaklarda tespit edilebilmektedir.

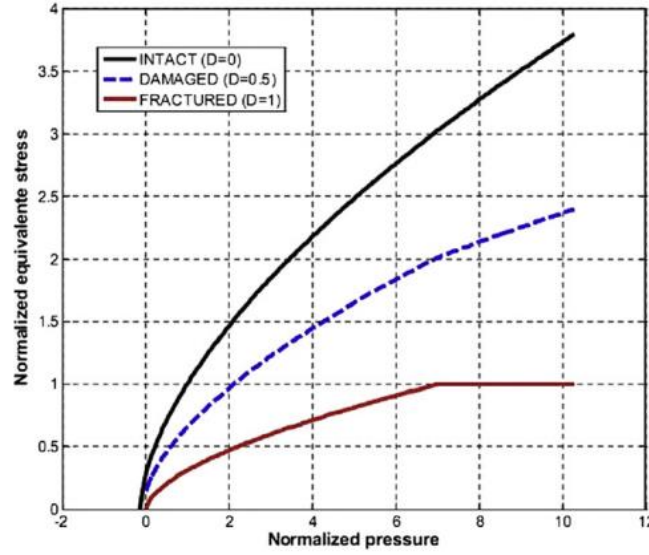
Parçalanma terimi; Katı malzemelerin ortalama parça boyutunu ezilme, kesilme, titreşim veya bu gibi proseslerle daha küçük tane boyutuna indirmek demektir. Terminal balistikte incelenen parçalanma; kırılma malzemeler, cam, seramik ve konsantr aglomeratlar da tespit edilmektedir. Şekil 4.'de incelendiği gibi, etkilenen bölge merminin ön kısmında bulunsada, parçalanma koni kırığı içinde kalmaktadır. Normalde uzun silindirik çubuğun hiper hızlarda malzemeye verdiği hasar olarak görülse de yüksek hızlarda küçük mermilerin verdiği hasar olarak da görülebilir. Şekil 2.5'te görülebileceği gibi, hasar mekanizmalarının araştırılması ve farklı balistik savunma sistemleri/modülleri üzerine çeşitli çalışmalar gerçekleştirilmiştir (Kocer, 2003 ve Carton vd., 2014).



Şekil 4. Kırılma malzeme de sınırlı alanda meydana gelen ezilme (Crouch, 2016)

Seramik malzemelerin balistik koruma için etkili olabilmesi için belirli özelliklere sahip olmaları gerekmektedir. Bu özellikler arasında yüksek sertlik, kırılma direnci, elastisite modülü ve düşük yoğunluk bulunur. Balistik zırh uygulamaları için değişik seramik malzemeler kullanılmaktadır, ancak en yaygın olarak kullanılanlar içinde bor karbür (B4C), silisyum karbür (SiC) ve alüminadır. ( $Al_2O_3$ ).

Johnson-Holmquist (JH) tarafından yapılan çalışmada, seramik malzemelerin inelastik deformasyonu ve kırılması üzerine kuramsal bir model olan Johnson-Holmquist (JH) modeli geliştirilmiştir. Bu modelde iki farklı gerilme değeri dikkate alınmıştır. Birincisi, hasarsız durumda ölçülen eşdeğer gerilme değeridir, diğeri ise hasar sonrası ölçülen eşdeğer gerilme değeridir. Lamberts ve arkadaşları (2007) tarafından JH-1 ve JH-2 olarak adlandırılan iki farklı model geliştirilmiştir. Şekil 5'te gösterilen JH-2 modeli, kuvvet kaynaklı gerilmeleri, uzama oranlarını ve deformasyondan sonraki kuvvet değerlerini içeren ek bilgileri içermektedir. Bu model, literatürde genellikle tercih edilen bir modeldir. (Tasdemirci ve Hall, 2007), (Wang ve Yang, 2008).



Şekil 5. Johnson-Holmquist 2 Modeli

### 3- Sayısal Çalışmalar

Seramik malzemeler için JH modeli, normalize eşdeğer gerilme 1 numaralı denklemlerle gösterilmiştir.

$$\sigma = \sigma_i^l - D(\sigma_i^l - \sigma_f^l) \quad (1)$$

$\sigma_i$  ilk durumda meydana gelen gerilme,  $\sigma_f$  hasar durumunda oluşan gerilme, D ise hasar faktörü olarak verilmiştir ve 2 ve 3 numaralı denklemlerle gösterilmiştir.

$$\sigma_i^l = A(P^* + T^*)^N (1 + \ln e^*) \quad (2)$$

$$\sigma_f^l = B(P^*)^M (1 + C \ln e^*) \quad (3)$$

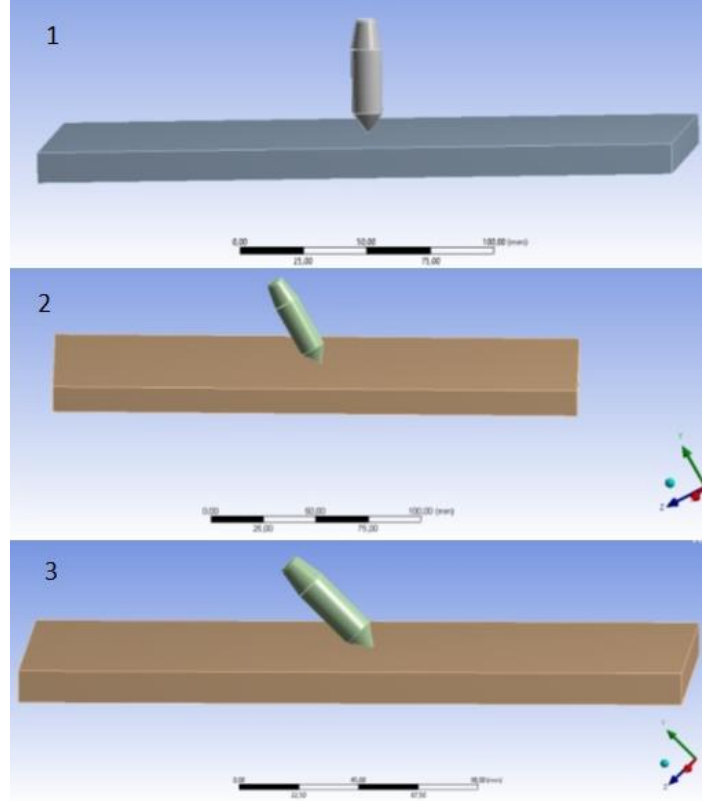
A, B, C, M, ve N sabit değerler olup,  $P^*$  normalize edilmiş basınç gerilmesini ve  $T^*$  maksimum hidrostatik çekme gerilmesini temsil eder.  $e^*$  ise boyutsuz deformasyon hızıdır. K1 hacim modülü, K2 ve K3 malzeme sabitleri ve c ise sıkışabilirlik faktörü olarak kabul edilir. Hidrostatik gerilme, basınç artışının eklenmesiyle elde edilir ve üç farklı durumunu araştırır. D=0 hasarsız olduğu durumu,

$D=0.5$  hasar aldığı durumu ve  $D=1$  kırılma durumunu temsil eder. Normalleştirilmiş basınç aşağıdaki denklemle ifade edilir. Seramik malzeme modeli için; A sağlam dayanım sabiti, N sağlam dayanım üstel faktörü, HEL Hugoniot elastik limiti, B kırılma dayanım sabiti, M kırılma dayanım üstel faktörü ve C deformasyon oranı sabiti olarak alınmış değerler Çizelge 2.3'te verilmiştir.

$$P = K_1 \dot{c} + K_2 \dot{c}^2 + K_3 \dot{c}^3 + \Delta P \quad (4)$$

**Çizelge 2.1.** Analizde kullanılan alümina seramikler için Johnson-Holmquist malzeme modeli için parametre değerleri (Westerling ve Lundberg)

A	N	HEL (MPa)	B	M	C
0,989	0,3755	5900	0,77	1	0

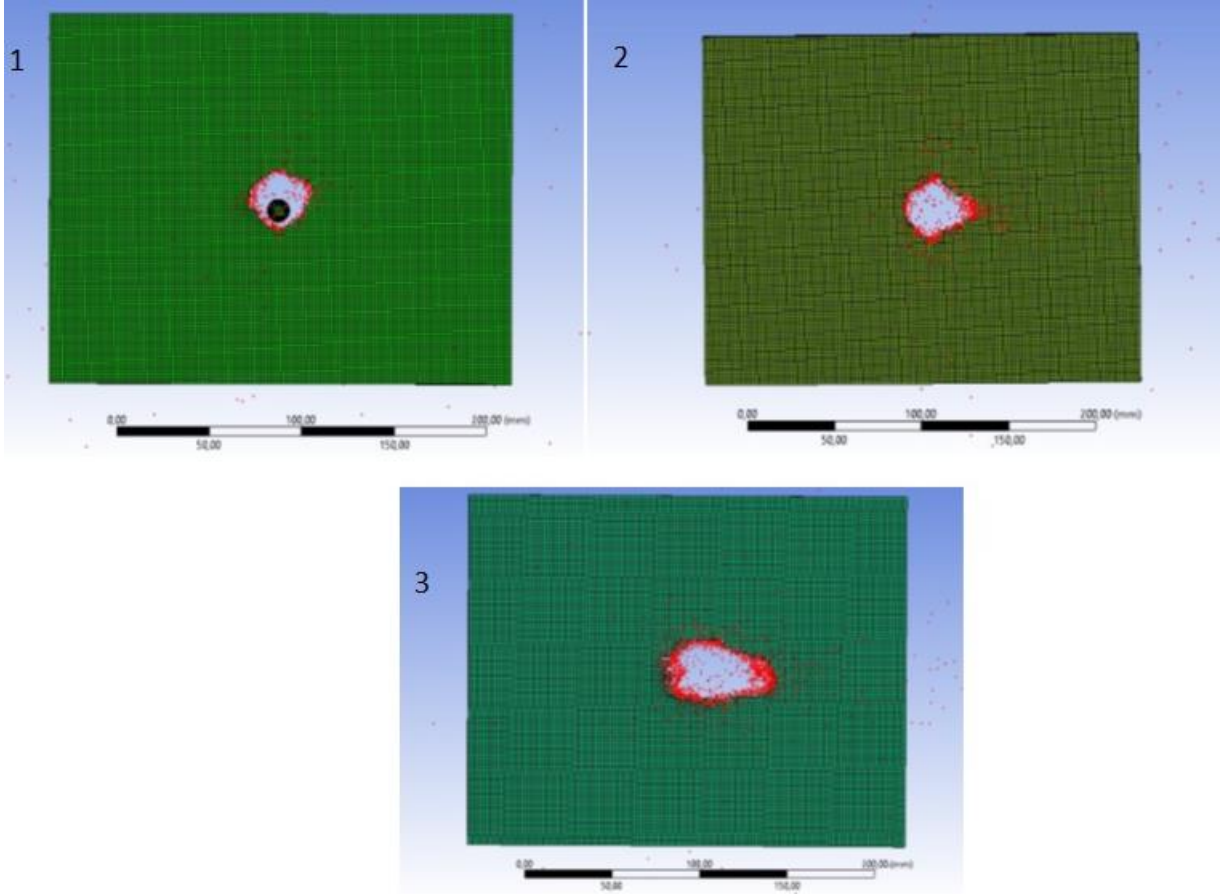


Şekil 6. Mermi Çarpma Açıları 1.90°, 2. 30°, 3. 45°

#### 4- Çarpma Sonucu Seramikte Oluşan Hasar

Dikdörtgen şeklinde hazırlanan seramik plakalara farklı açılarda (30, 45 ve dik) ve 838 m/s hızda mermi etki ettirilmiştir. Analiz sonuçlarına göre, mermi tüm modellerde kırılmaya neden olmuş ve bu kırılma sonucunda mermide mantarlaşma gözlenmiştir.

45° açıyla çarpan mermi, diğer sonuçlara kıyasla yanal olarak daha fazla hasara sebep olmuştur. Bu yanal hasar sonucunda mantarlaşmanın sıyrıлма şeklinde olduğu tespit edilmiştir. Yani, mermi seramik yüzeye çarptıktan sonra yanal yönde bir sıyrıлма hasarı oluşmuştur. Mermi dik olarak çarptığında ise, seramik üzerinde yuvarlak kesitli bir hasar oluşmuştur. Bu hasar, mermi açısı arttıkça daha geniş bir alanda etki yaparak hasarı artırmıştır. Yani, mermi açısı arttıkça seramik üzerindeki hasar alanı genişlemiştir. Bu veriler, farklı açılarda mermilerin seramik üzerindeki etkisini gösteren analiz sonuçlarını açıklamaktadır. Bu sonuçlar, mermi geometrisi ve açısının seramik üzerindeki hasar şekillerini ve hasar alanını etkilediğini göstermektedir.



Şekil 7. Mermi Çarpma Açılarına Bağlı Olarak Oluşan Deformasyonlar 1.90°, 2. 30°, 3. 45°

Mermi açısı arttıkça, kinetik enerjinin seramik yüzeyine transferi değişir. Dik bir açıyla çarpan mermi, kinetik enerjisini daha yoğun bir şekilde bir noktaya odaklar ve bu da daha yüksek bir basınç ve hasar bölgesi oluşturur. Ancak açı arttıkça, kinetik enerji yayılır ve hasar alanı daha geniş bir alana yayılır. Bu daha geniş etki alanı, seramik üzerinde daha fazla hasara yol açar. Kesit alan hasarı dik olan seramikde yaklaşık olarak 71 mm<sup>2</sup>, 30° olan mermide 97 mm<sup>2</sup>, 45° olan mermide 145 mm<sup>2</sup> olarak tespit edilmiştir. Mermi açısı arttıkça, seramik malzeme üzerindeki gerilim dağılımı da değişir. Daha dik bir açıda çarpan mermi, seramik malzemenin içindeki gerilimi daha yoğunlaştırır ve kırılma mekanizmalarını tetikler. Seramik malzeme genellikle kırılğan olduğu için, bu kırılma mekanizmaları çatlakların oluşmasına ve malzemenin parçalanmasına yol açar. Bu da hasarın artmasına ve daha geniş bir alanda yayılmasına neden olur. Burada seramik boyutları büyük tutulduğu için bu hasarlar görülmemiştir.

## 5- Sonuçlar

Merminin seramik üzerinde bıraktığı hasar, çeşitli faktörlere bağlı olarak değişebilir. Bu faktörler arasında mermi hızı, kalınlığı, malzeme yapısı, açısı ve etkileşimin süresi gibi etkenler yer alır.

Mermi açısı arttıkça, seramik üzerindeki hasarın artmasının temel nedenleri enerji transferindeki değişim, daha uzun etki süresi ve farklı kırılma mekanizmalarıdır. Mermi açısının etkisi incelenmiş olup hasar alan bölgenin kesit alanları incelenmiştir. Bunun yanı sıra mermi çıkış hızlarındaki düşüş, çok katmanlı balistik savunma çözümlerinde önemlidir. Açılı gelen bir merminin seramiğe daha fazla hasar vermesinin dezavantajı, çok katmanlı tasarlanan plakalarda avantaj olarak sağlanabilir. Savunma araçları tasarlanırken açının ve katmanların önemi burada tekrar ön plana çıkmaktadır.

## Referanslar

Army U., *Interior Ballistics of Guns. Engineering Design Handbook: Ballistics Series, United States Army Materiel Command.* 1965.

Candan C., "Kompozit zırh imalat parametrelerinin terminal balistik özellikler üzerine etkileri," Selçuk Üniversitesi, 2005.

Carton E. P., Weerheijm J., Ditzhuijzen C., and Tuinman I., "Fragment and particle size distribution of impacted ceramic tiles," in 28th International Symposium on Ballistics, Atlanta, Georgia, USA, 22-26 September 2014, 1254-1265, 2014.

Crouch I., *The science of armour materials.* Woodhead Publishing, 2016.

- Holmquist T. J., Templeton D. W., and Bishnoi K. D., "Constitutive modeling of aluminum nitride for large strain, high-strain rate, and high-pressure applications," *Int. J. Impact Eng.*, vol. 25, no. 3, pp. 211–231, 2001.
- Johnson G. R. and Cook W. H., "Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures," *Eng. Fract. Mech.*, vol. 21, no. 1, pp. 31–48, 1985.
- Kocer C., "Using the Hertzian fracture system to measure crack growth data: A review," *Int. J. Fract.*, vol. 121, no. 3–4, pp. 111–132, 2003.
- Lamberts A., Geers M. G. D., Dommelen J. A. W., Lange H. C., Huizinga A., and BV P. D. E. A., "Numerical simulation of ballistic impacts on ceramic material," *Eindhoven Univ. Technol.*, 2007.
- Tasdemirci A. and Hall I. W., "Numerical and experimental studies of damage generation in multi-layer composite materials at high strain rates," *Int. J. Impact Eng.*, vol. 34, no. 2, pp. 189–204, 2007.
- The Editors of *Encyclopædia Britannica*, T.E.o.E. 2017.
- Wang Y.-F. and Yang Z.-G., "Finite element model of erosive wear on ductile and brittle materials," *Wear*, vol. 265, no. 5–6, pp. 871–878, 2008.
- Westerling L. and Lundberg T., "The influence of confinement on the protective capability of ceramic armour at two different velocities," in *15th Int. Symp. on Ballistics*, 1995, pp. 283–290.
- Zack Gable J. W., Hurley J., Chojnicki T., "Physics 001," *Sci. Ballist.*, 2007.
- Zook J. A., Frank K., and Silsby G. F., "Terminal ballistics test and analysis guidelines for the penetration mechanics branch," *Army Ballistic Research Lab Aberdeen Proving Ground*, 1992.