

**T.C.  
GİRESUN ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**TUNGSTEN ALAŞIMLI KİNETİK ENERJİLİ MÜHİMMATIN  
BOR KARPİT TAKVİYELİ 4340 ÇELİK PLAKALAR  
ÜZERİNDEKİ BALİSTİK ETKİSİNİN SAYISAL İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Burak İLHAK**

**Enstitü Anabilim Dalı : Makine MÜHENDİSLİĞİ**

**Tez Danışmanı : Dr. Öğr. Üyesi Faruk GÜNER**

**Ocak 2019**

T.C.  
GİRESUN ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TUNGSTEN ALAŞIMLI KİNETİK ENERJİLİ MÜHİMMATIN  
BOR KARPİT TAKVİYELİ 4340 ÇELİK PLAKALAR  
ÜZERİNDEKİ BALİSTİK ETKİSİNİN SAYISAL İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Burak İLHAK

Enstitü Anabilim Dalı : Makine MÜHENDİSLİĞİ

Bu tez 09/01/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği / oyçokluğu ile kabul edilmiştir.

Dr. Öğr. Üyesi  
Faruk GÜNER  
Jüri Başkanı

Prof. Dr.  
Hasan SOFUOĞLU  
Üye

Prof. Dr.  
Mükrimin Şevket GÜNEY  
Üye

Doç. Dr.  
Bahadır KOZ  
Enstitü Müdürü

## BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.



Burak İLHAK  
09/01/2019

## TEŞEKKÜR

Tez çalıőmamın tım aőamalarında her turlü bilimsel desteği sağlayan, bilgi birikimleri ve değerli gürüşleriyle katkı sağlayan, bilimsel araőtırmanın nasıl yapılacağını bana öğreten değerli hocam Dr. Öğr. Üyesi Faruk GÜNER' e ve yüksek lisans eğitimi boyunca bana destek veren hocalarıma teşekkür ederim. Ayrıca tez çalıőmam sırasında maddi ve manevi yardımlarını esirgemeyen aileme de teşekkür ederim.



# İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	I
İÇİNDEKİLER.....	II
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	IV
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	V
TABLolar LİSTESİ.....	VII
BÖLÜM 1.GİRİŞ.....	1
1.1 Anti Tank Mühimmat Çeşitleri.....	6
1.2 Zırh Çeşitleri.....	7
1.3 Malzeme Modelleri.....	10
1.3.1. Johnson-Cook Malzeme Modeli.....	10
1.3.2. Johnson-Holmquist Malzeme Modeli.....	11
1.4. Tezin Amacı ve Önemi.....	13
BÖLÜM 2. YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	14
2.1 Mühimmat ve Zırhın Geometrisinin oluşturulması.....	14
2.1.1 Tasarlanan Mühimmat Geometrisi.....	16
2.1.2 Tasarlanan Zırh Geometrileri.....	16
2.2 Malzeme Modeli ve Modele Ait Parametrelerin Belirlenmesi.....	18
2.3 Katı Modelinin Doğrulanması.....	21
BÖLÜM 3. SAYISAL ÇALIŞMALAR.....	22
3.1 Zırh Açısının 0 Derece Olduğu Durumda Çarpışmanın Numerik Analizi.....	23

3.2 Zırh Açısının 15 Derece Olduğu Durumda arpışmanın Numerik Analizi.....	28
3.3 Zırh Açısının 30 Derece Olduğu Durumda arpışmanın Numerik Analizi.....	33
3.4 Zırh Açısının 45 Derece Olduğu Durumda arpışmanın Numerik Analizi.....	38
BÖLÜM 4. SONUÇLAR.....	44
BÖLÜM 5.ÖNERİLER.....	45
KAYNAKLAR.....	46
ÖZGEÇMİŞ.....	50

## SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

$K_1$	: Bulk Modülü
$\varepsilon_{eff}^p$	: Efektif plastik uzama
$T_M$	: Erime sıcaklığını
$\sigma'_f$	: Hasar Durumundaki Gerilme
$D$	: Hasar Faktörü
$P$	: Hidrostatik Gerilme
$\sigma'_i$	: İlk Durumdaki Gerilme
$C_1, C_2, C_3, M, N$	: Johnson Cook Malzeme Modeli Malzeme Parametreleri
$A, B, C, M, N$	: Johnson Holmquist Malzeme Parametreleri
$D_1, D_2$	: Johnson Holmqist Malzeme Sabitleri
$T^*$	: Maksimum Hidrostatik Çekme Gerilmesi
$K_2, K_3$	: Malzeme Sabitleri
$P^*$	: Normalize Basınç
$T_R$	: Referans sıcaklık
$\dot{\varepsilon}_0$	: Referans Uzama Oranı
$\dot{c}$	: Sıkıştırılabilirlik Faktörü
$e'^*$	: Uzama Oranı

## ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1. JH-2 Modelinin Hasar Tanımlaması.....	12
Şekil 2. Kinetik Enerjili Mühimmatın Yapısı .....	15
Şekil 3. Tasarlanan Penetrator Geometrisi.....	16
Şekil 4. Tasarlanan Bor Karbür Zırhı.....	17
Şekil 5. Tasarlanan 4340 Çelik Zırh.....	17
Şekil 6. Modelin Montajlı Durumu.....	17
Şekil 7. Eleman Boyutlarına Göre Hesaplanan Enerjinin Referans Enerji Değeriyle Karşılaştırılması.....	21
Şekil 8. Modelin 4mm Eleman Boyutlarda Elemanlara Ayrılması.....	21
Şekil 9. Penetrator ve Farkı Açılardaki Zırh Görseli.....	22
Şekil 10. 0° Çarpışma İçin Görsel Analiz Sonuçları.....	23
Şekil 11. 0° Çarpışma İçin Penetratorün Analiz Sonundaki Görselleri.....	25
Şekil 12. 0° Çarpışma İçin Penetrator von Mises Gerilmeleri.....	25
Şekil 13. 0° Çarpışma için Bor Karbür Zırhın Analiz Sonundaki Görselleri.....	26
Şekil 14. 0° Çarpışma İçin Bor Karbür von Mises Gerilmeleri.....	27
Şekil 15. 0° Çarpışma İçin 4340 Çelik Zırh Analiz Sonundaki Görselleri.....	27
Şekil 16. 0° Çarpışma İçin 4340 Çelik von Mises Gerilmeleri.....	28
Şekil 17. 15° Çarpışma İçin Analizin Görsel Sonuçları.....	29
Şekil 18. 15° Çarpışma İçin Penetrator Analiz Sonundaki Görselleri.....	30
Şekil 19. 15° Çarpışma İçin Penetrator von Mises Gerilmeleri.....	31
Şekil 20. 15° Çarpışma İçin Bor Karbür Zırh Analiz Sonundaki Görselleri.....	31
Şekil 21. 15° Çarpışma İçin Bor Karbür von Mises Gerilmeleri.....	32
Şekil 22. 15° Çarpışma İçin 4340 Çelik Zırh Analiz Sonundaki Görselleri.....	32
Şekil 23. 15° Çarpışma için 4340 Çelik von Mises Gerilmeleri.....	33
Şekil 24. 30° Çarpışma İçin Analizin Görsel Sonuçları.....	34
Şekil 25. 30° Çarpışma İçin Penetrator Analiz Sonundaki Görseller.....	35
Şekil 26. 30° Çarpışma İçin Penetrator von Mises Gerilmeleri.....	36
Şekil 27. 30° Çarpışma İçin Bor Karbür Zırh Analiz Sonundaki Görselleri.....	36
Şekil 28. 30° Çarpışma İçin Bor Karbür von Mises Gerilmeleri.....	37
Şekil 29. 30° Çarpışma İçin 4340 Çelik Zırh Analiz Sonundaki Görselleri.....	37



Şekil 30. 30° Çarpışma İçin 4340 Çelik von Mises Gerilmeleri.....	38
Şekil 31. 45° Çarpışma İçin Analizin Görsel Sonuçları.....	39
Şekil 32. 45° Çarpışma İçin Penetrator Analiz Sonundaki Görseli.....	40
Şekil 33. 45° Çarpışma İçin Penetrator von Mises Gerilmeleri.....	41
Şekil 34. 45° Çarpışma İçin Bor Karbür Zırh Analiz Sonundaki Görseller.....	41
Şekil 35. 45° Çarpışma İçin Bor Karbür von Mises Gerilmeleri.....	42
Şekil 36. 45° Çarpışma İçin 4340 Çelik Zırh Analiz Sonundaki Görselleri.....	42
Şekil 37. 45° Çarpışma İçin 4340 Çelik von Mises Gerilmeleri.....	43



## TABLULAR LİSTESİ

Tablo 1. Tungsten Alaşımı için Değer ve Parametreler.....	18
Tablo 2. Bor Karbür Malzeme ve Johnson-Holmquist Modeli Değerleri.....	19
Tablo 3. 4340 Çelik Malzeme ve Johnson-Cook Parametreleri.....	19
Tablo 4. 0° Çarpışma İçin Analiz Süresince Penetrator Hız Tablosu.....	24
Tablo 5. 15° Çarpışma İçin Analiz Süresince Penetrator Hızları.....	30
Tablo 6. 30° Çarpışma Analizi Süresince Penetrator Hızları.....	35
Tablo 7. 45° Çarpışma Analizi Süresince Penetrator Hızları.....	40



# TUNGSTEN ALAŞIMLI KİNETİK ENERJİLİ MÜHİMMATIN BOR KARPİT TAKVİYELİ 4340 ÇELİK PLAKALAR ÜZERİNDEKİ BALİSTİK ETKİSİNİN SAYISAL İNCELENMESİ

## ÖZET

Birinci dünya savaşında sahneye çıkan tanklar, ikinci dünya savaşı sırasında önemini ciddi anlamda artırmıştır. Zırhlı araçların savaş alanındaki üstünlüğü sebebiyle hem zırh teknolojisi hem de mühimmat teknolojisi günümüzde hızla gelişmektedir. Bu çalışmada tungsten alaşımlı kinetik enerji mühimmat penetratorünün, 4340 çelik ve bor karbür zırh levhaların üzerine olan etkisi sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Oluşturulan sonlu elemanlar modeline uygun malzeme modelleri (Johnson-Cook, Johnson-Holmquist) için gerekli malzeme parametreleri belirlenmiştir. Mühimmatın etki alanı içerisinde penetratorun zırha farklı çarpma açılarında çarpmasının numerik analiz yoluyla 3 boyutlu analizleri yapılmıştır. Farklı açılardaki çarpışma analizlerinde penetratorün zırhı deldiği görülmüştür. 1750m/s olan penetrator hızı 0 derece açıdaki zırhı deldikten sonra hızının 1513,16 m/s ye düştüğü, 15 derece açıdaki zırh analizinde hızının çarpışmadan sonra 1463 m/s olduğu, 30 derece açıdaki çarpışma analizinde çarpışmadan sonra 1390,1 m/s olduğu son olarak 45 derece açıdaki çarpışma analizinde çarpışmadan sonra 1269,5 m/s olduğu görülmüştür. Analizler sonucunda zırh ve mühimmatta oluşan gerilmeler ve deformasyonlar sunulmuştur.

**Anahtar kelimeler:** Sonlu Elemanlar Yöntemi, Tungsten Alaşımlı Penetrator, Bor Karpit, 4340 Çelik, Johnson-Cook, Savunma Sanayi

# NUMERICAL INVESTIGATION OF THE BALLISTIC EFFECT OF TUNGSTEN ALLOY KINETIC ENERGY AMMUNITION ON BORON CARBIDE REINFORCED 4340 STEEL PLATES

## SUMMARY

The tanks that took part in the First World War have made significant progress during the Second World War. Because of the superiority of armored vehicles on the battlefield, both armor technology and ammunition technology are developing rapidly nowadays. In this study, the effect of tungsten alloy kinetic energy ammunition penetrator on 4340 steel and boron carbide armor plates was investigated by finite elements methods. The required material parameters for the finite element model (Johnson-Cook, Johnson-Holmquist) were determined. Within the domain of ammunition, three-dimensional analysis of the impactor by multiplication of the penetrator at different collision angles was done by numerical analysis. In the collision analysis at different angles, it was observed that the penetrator pierced the armor. The penetrator speed of 1750m / s was found to decrease to 1513.16 m / s after drilling the 0 degree angle armor. In the analysis of the armor at 15 degrees angle, the velocity was found to be 1463 m / s after the collision. The analysis of the armor at 30 degrees was observed to be 1390.1 m / s after the collision. Finally, after the collision in the collision analysis of the armor at 45 degrees, the velocity was found to be 1269.5 m/s. Stresses and deformations in armor and ammunition are presented.

**Keywords:** Finite element methods, Tungsten Alloy Penetrator, Boron Carbide , 4340 Steel, Johnson-Cook, Defence Systems

## BÖLÜM 1. GİRİŞ

İlk çağlardan beri insanoğlu savaş alanlarında üstünlük sağlamak için birçok yönteme başvurmuştur. Metalin işlenmesi sayesinde savaşlarda öncelikle saldırı ve savunma için kılıç ve kalkanı kullanmıştır. Üstünlük kurma çabasının sonucunda, gerek at, fil gibi hayvanlardan gerek savaş arabalarından yararlanmışlardır.

Ortaçağda insanlar kalın zırhların kılıç ve okların tesirlerini bertaraf etmesinden dolayı hem kendileri hem de savaş alanında kullanılan hayvanları kalın zırhlar kullanarak korumaya almışlardır. Ateşli silahların savaş alanında kullanılması sonucu bu zırhlar da etkisini yitirmeye başlamıştır. Rönesans İtalya'sının meşhur büyük sanatçısı Leonardo da Vinci, üstün hayal gücü ve başarılı çizimleriyle modern tankın ve zırhlı aracın bir taslağını ortaya koyabilmiş ve kullanılmasını da aynen şöyle açıklamıştır: “Kapalı, emniyetli ve tahribi güç savaş arabaları yapıyorum. Bunlar toplarıyla ateş ederek ilerlediklerinde, en kuvvetli düşman safları dahi çözümlenerek geri çekilmek zorunda kalacaktır. Bunların arkasından kendi piyademiz emniyetle ve mukavemetsiz ilerleyebilecektir” demiştir[1]. Yüzyıllar boyunca birçok askeri ve sivil şahıs Leonardo da Vinci gibi kesin sonuç silâhları yapmaya çalışmıştır.

20.yy da 1.dünya savaşında ilk olarak İngilizler tarafından kullanılan tanklar[2], savaş alanında çok büyük bir etki göstermiş ve zırh teknolojisini hızlı bir şekilde gelişmesine yol açmıştır. Savaş alanlarında bu gelişmelere takiben hem taarruz için kullanılan tanklar hem de askerlerin güvenli bir şekilde nakillerine olanak veren zırhlı personel taşıyıcılar yaygın şekilde kullanılmaktadır. Özellikle mayın ve güçlü mühimmatlar ile bu araçların durdurulması amaçlanmıştır. Zırhlı araçların savaşta devre dışı bırakabilmek için özel mühimmatlar üretilmiş bu şekilde Anti Tank mühimmatları adı altında yeni bir mühimmat grubu oluşturulmuştur. Özellikle İkinci Dünya savaşında tank ve anti tank mühimmatları büyük gelişme göstermiş, çok çeşitli ve farklı özellikte tank ve anti tank mühimmatı geliştirilmiştir.

Günümüzde de ülkelerin içinde bulunduğu savaşlar ve gerçekleşebilecek tehditlere karşı ortaya çıkan savunma ihtiyaçları gereği, kara savaşlarının esas unsuru olan tank ve anti tank mühimmatları gelişmeye devam etmektedir. Sağladığı avantaj nedeniyle, her silah sisteminde olduğu gibi, tanklara karşı savunma sistemleri de geliştirilmiştir.

Zırh alanındaki Karagöz, Atabek'in [3] çalışmasında bor katkılı çelik saclar üzerine uygulanan değişik ısıl işlemler sonrası elde edilen mikro yapı karakteristiği ve bu mikro yapıların mekanik test değerleri karşılaştırılmalı olarak vermeyi amaçlanmıştır. Tüm bunların dışında darbe testi sonrası elde edilen kırılma yüzeyleri üzerine fraktografik incelemeler yapılarak kırılma karakteristiği belirlenmek istenmiştir. Yeni dizayn edilmiş, sertleştirilmiş ve temperlenmiş çeliğin mikro yapısının oldukça homojen olduğu ve elde edilen balistik sonuçların da memnun edici bir karakteristik sunduğu belirtilmiştir. Ayrıca kırılma sonrası yapılan fraktografik incelemelerde çelik içi çatlak başlangıç bölgeleri gösterilmiştir.

Çok katmanlı metalik ve seramik hedeflerin üzerine silindirik mermilerin yüksek hız etkisini sayısal olarak analiz edilen bir çalışmada mermi malzemesi olarak S7 takım çeliği ve tungsten kullanılmıştır. Hedefler için ise 4340 çelik, bor karbür, seramik ve haddelenmiş homojen zırh kullanılmıştır. Gevrek ve seramik malzemeler için Johnson-Holmquist modeli, metalik malzemeler için Johnson-Cook malzeme modeli kullanılmıştır. Çalışmada çok katmanlı seramik zırhların deformasyonu için çok yüksek hızların gerekli olmadığı sonucuna ulaşılmıştır [4].

Başka bir çalışmada tungsten alaşımlı penetratorde yüksek hız etkisi ile oluşturulan adyabatik makaslama bantlarının mikro yapıları incelenmiştir. Penetrator, yüksek hız etki ile yüksek şekil değiştirme hızında deforme olmuş ve darbe girişinden sonra kalan penetratorün ve enkazın mikro yapısı görsel yöntemlerle incelenmiştir. Uzamış tungsten partikülleri ve tungsten oksitleri gibi tepkime ürünleri, muhtemelen yüksek hızlı darbeye bağlı olarak meydana gelen lokal sıcaklık artışından ötürü hasar alan bölgelerin yüzey kısmında gözlemlendiği belirtilmiştir. Kalan nüfuz edicinin yüzey çatlaklarına yakın bölgelerde az sayıda adyabatik makaslama bandı olduğu

gözlemlenmiş ve bunların genişliğinin zırh plakalarında oluşan kesme bandına göre daha geniş olduğu söylenmiştir. Çatlağın, makaslama bandı boyunca yayılan genel eğilimlere sahip olduğu, fakat bazen çatlakların yayılma yolunun tungsten parçacıkları arasındaki ara yüzeyler boyunca değiştiği gözlemlenmiştir. Kesme bantlarının mikro yapıları gözlemlendiğinde, tungsten alaşımının penetrasyon performansını arttırmak için, tungsten parçacık ara yüzlerinin en aza indirilmesi ve imalat işleminin optimizasyonunun gerekli olduğu önerilmiştir [5].

Penetratorun kompozit zırhlara etkisinin cevabını arayan bir çalışmada, yüksek kaliteli kompozit seramik esaslı zırhların tungsten alaşımlı penetrator karşısındaki performansları incelenmiştir. Kompozit zırh olarak SiC-B, SiC-N, SiC-SC-1RN ve SiC-HPN kullanılmıştır. Tungsten merminin sahip olduğu hızlar ile Vickers sertliği ve seramik malzemelerin kırılma dayanıklılığı ile karşılaştırmıştır[6].

Tungsten ve bor karbür materyal kullanılan bir çalışmada hızları 1400m/s ve 2600m/s arasında değişen tungsten penetratorların bor karbür zırhlarına karşı olan etkileri araştırılmıştır. Deneysel sonuçlar, penetrasyon sürecinin üç farklı bölgede farklı karakterlere sahip olduğu belirtilmiştir. Düşük darbe hızlarında, hiçbir penetrasyonun gerçekleşmediği, yüksek darbe hızlarında, nüfuz etme hızı ve çarpma hızı arasındaki ilişkinin yaklaşık doğrusal olduğu, penetrasyonun sabit ve simetrik olduğu, aralarında dar bir geçiş bölgesi olduğunun görüldüğü açıklamıştır. Aralıklı ve kuvvetli değişken penetrasyon hızına sahip hızlar bu bölgenin alt kısmında, merminin uzatılmış yanal akışı hedefin yüzeyinde gerçekleşmiş, özellikle yüksek darbe hızlarında penetrasyon hızındaki kısıtlamanın küçük olduğu bulunmuştur. Darbe hızının analiz sonuçlarına göre darbe hızının oldukça iyi anlaşıldığı deney sonuçları ile elde edilen hasarın evrimi, geçiş bölgesinin altında askıya alındığını söylenmiştir [7].

Zırh alanında yapılan başka bir çalışmada zırh tasarımında kullanılan yüksek mukavemetli fiber malzemeler üzerinde durulmuştur. Çalışmada ayrıca kurşun yeleklerde kullanılan materyaller ve özel kumaşların dokuma tipleri üzerinde durulmuştur. Zırh tasarımında kullanılan fiber materyallerin karşılaştırılması yapılmış,

tasarımda kullanılan kompozit malzemelerin darbe dayanımına etki eden faktörleri incelemiştir. Çalışma sonucunda zırh tasarımlarından beklenen özelliklerin hafiflik, düşük maliyet ve yüksek hareket kabiliyeti sağlayabilmesi olduğu söylenmiştir. Bu özelliklerin hepsi bir arada kompozit malzemeler ile sağlanabildiği söylenmiştir. Yüksek mukavemetli kumaşların yapısal geometrileri bakımından 3 gruba ayrılmakta olduğu, bunların düzlemsel plakalar, 2D kumaşlar ve 3D kumaş olduğu söylenmiştir. Bu üç grup içinden en yüksek enerji sönmleme kapasitesine sahip olan grup 3D kumaş geometrisine sahip kumaşlar olduğu söylenmiştir. Yüksek mukavemetli fiberlerin darbe dayanımları ile ilgili çalışmalar incelendiğinde yüksek mukavemetli kumaşların yapısal özellikleri sebebiyle darbeyi daha geniş bir alana yayarak daha hızlı sönmlediği sonucuna ulaşılmıştır [8].

Zırh ile ilgili bir çalışmada farklı hızlardaki mermileri durdurmak için farklı bölgesel yoğunluktaki zırh panellerinin başarısı, paneller içerisindeki hasarın konuma göre dağılımı, zırh panelinin arka yüzeyinde oluşan çıkıntının zamana göre gelişimi incelenmiştir [9].

Alüminyum nitrit zırhların uzun bir tungsten çubukla penetrasyonunu ölçmek için 26 terminal balistik deneyi gerçekleştirilmiş olan başka bir çalışmada, penetratorun darbe hızları 1,5km/s ile 4,5km/s arasında değişmektedir. Tüm testlerde hemen hemen penetratorün çap boy oranı  $L/d=20$  olarak seçilmiştir. Sınırlı verilerle, bu küçük ölçekli ters balistik deneylerden penetrasyon hızı ve toplam penetrasyon derinliği için verilerin en az altı kat daha büyük boyutlarda olduğu sonucuna ulaşılmıştır [10].

Yine benzer bir çalışmada nitrit zırhta olduğu gibi silikon karbür zırhların da uzun bir tungsten çubukla penetrasyonunu ölçmek için 27 terminal balistik deneyi gerçekleştirilmiştir. Darbe hızları 1,5km/s ile 4,5km/s arasında değişmektedir. Tüm testlerde hemen hemen penetratorün çap boy oranı  $L/d=20$  olarak seçilmiştir. Bu küçük ölçekli ters balistik deneylerden penetrasyon hızı ve toplam penetrasyon derinliği için verilerin en az altı kat daha büyük boyutlarda olduğu sonucuna ulaşılmıştır [11].



Bor karbür zırh için yapılan bir çalışmada AK-47 mühimmatı olarak bilinen 7,62mm çapında ve 39mm uzunluğa sahip mermilerin bor karbür zırha olan etkileri araştırılmıştır. Çalışma sonucu elde ettiği bulgulara, penetrasyon olayının iki aşamalı bir süreç olarak görüldüğünü, birinci aşamanın, ince çelik çekirdeğin seramiğin yüzeyi üzerinde veya yakınında mantarlanmayı içerdiği, ikincisinin de çekirdeğin kendisine nüfuz ettikçe doğrusal bir deformasyon işlemine sahip olduğunu söylemiştir. Bu ikinci adımın daha önce AK-47 mermileri için rapor edilmediğini söylemiştir. Ayrıca kılıfın ve kurşun dolgu malzemesinin çıkarılması durumunda çekirdeğin durma eğiliminin arttığını söylemiştir [12].

Bor karbür ile ilgili başka bir çalışmada, iç yapısı ve mekanik özellikleri optimize edilen kalınlığı yaklaşık 1cm olan bor karbür alaşımlı kompozit plakaları 1cm kalınlığındaki cam elyaf örgülü destek plakası ile birleştirilerek elde edilen zırhın askeri standartlara uygun olarak yapılan balistik testlerdeki performansı incelenmiş, 4. Seviye (hızı 800-840m/s) olan tungsten çekirdekli mermilere karşı tam koruma sağladığı sonucuna ulaşmıştır [13].

Bor karbür zırhının araştırıldığı bir çalışmada üç farklı darbe yükü rejimine maruz kalan zırhın incelemesi yapılmıştır. Koşul A, yükleme koşulunun tek eksenli olduğu ve gerilmelerin ve basınçların yüksek olduğu plaka deneylerinden elde edildiğini söylenmiştir. Durum B, gerilmelerin genellikle plaka etkisinden daha düşük olduğu ve esnek olmayan kalın hedefler üzerine mermi darbesinden üretildiğini söylenmiştir. Koşul C, basınçların baskı ve gerginliğin bir kombinasyonu olduğu ince hedeflerin mermi darbesi ve performasyonundan üretildiğini açıklanmıştır. Johnson-Holmquist – Beissel (JHB) kurucu modeli, üç bölgenin her birinde materyal davranışını değerlendirmek için kullanılmış ve deneysel verilerle hesaplanmış sonuçlar elde etmek için üç model model sabitine ihtiyaç duyulduğunu belirtilmiştir [14].

Johnson-Cook malzeme modeli kullanılan bir çalışmada, hızla hareket eden mermilerle orta kalınlıkta tipik zırhlı çelik levhanın balistik çarpımını sayısal analizler

aracılığıyla araştırmıştır. Johnson-Cook yöntemi kullanılarak malzemenin deformasyonlarını hesaplamıştır. Analiz sonucunda bulunan hızlar balistik limit hızı ve performasyon sürelerini belirlemiş ve deneysel verilerle eşleştiği bulunmuştur[15].

### **1.1 Anti Tank Mühimmat eşitleri**

Anti tank mühimmatları gerek özelliklerine göre gerekse mühimmatların etki biçimlerine göre farklı şekillerde değerlendirilebilir.

Yüksek Patlayıcı Mühimmat (HEAT), sahip olduğu yüksek çıkış hızını kullanarak zırha etkili bir şekilde vurur. Mermi, tank zırhına gelmeden önce genellikle 2 metre kala parçalanarak dağılır. HEAT mühimmatının etkisi savaş başlığının çapı ile, diğer tabir ile bünyesinde barındırdığı delim gücünü sağlayan kimyasal madde miktarıyla doğru orantılıdır. Zırh dışında patlayan mermi, daha sonra çok küçük zırh alanlara çok büyük basınç uygulayarak çarpar ve savaş başlığında bulunan ve artık açığa dönüşmüş olan yüksek sıcaklıktaki kimyasal madde tankın içerisine püskürmeye başlar ve aracı imha eder [16].

Zırhlı araçlara karşı kullanılan bir başka mühimmat türü olan yüksek patlayıcı başlıklı mühimmat (HESH), içerisindeki savaş başlığında plastik patlayıcı bulunur. Bu tasarımıdaki mühimmatlar tank zırhını delip geçmek için tasarlanmamıştır Mühimmatın savaş başlığı geç patlamaya ayarlanmış plastik patlayıcı ile doludur ki bu patlama gecikmesi kullanıcı tarafından ayarlanabilir. Mühimmat tanka isabet ettiğinde bu plastik patlayıcı tank zırhı üzerinde infilak eder. Patlama tank zırhı üzerinde şok dalgaları üretir. Bu dalgalar zırhın içerisinden geçerek tankın iç kısmındaki zırhı parçalar ve tank içerisinde yüksek süratle bu parçaların dağılmasına sebep olur. Bunun sonucunda tank içerisindeki mürettebatın yara almasına hatta ölmesine sebep olur. Tank içerisindeki ekipman hasar görür veya hedef tankın kendi kullandığı mühimmat patlayabilir[17].

Zırh delici sabot sabitlemeli mühimmat (APFSDS), zırhı delmek için kullanılan mühimmat türüdür. Aynı zamanda kinetik enerjili mühimmat olarak ta bilinir Kinetik enerji mühimmatı haricindeki diğer mühimmatlar tank zırhını delmek için kimyasal reaksiyon sonucunda ortaya çıkan enerji ile oluşan delme gücünden yararlanmaktadır. Kinetik enerjili mühimmatlar adından da anlaşılacağı gibi sahip oldukları kütlelerin ilk hızından elde edilen kinetik enerjiden yararlanarak zırhı deler. APFSDS genellikle dört bölümden oluşur. Bunlar, zırhı delen kısım (Penetrator), itme gücünü veren patlayıcı, penetratorü konumlandıran tutucu (Sabot) ve ateşleme kapsülüdür. Penetrator yüksek mukavemete sahip genellikle tungsten ya da seyreltilmiş uranyumdan yapılan ok ya da mızrak şeklinde bir geometriye sahiptir. Yüksek bir namlu hızıyla çıkan penetrator çok küçük bir yüzey alanına çarparak yüksek mukavemeti sayesinde zırhı deler ve tankın içerisindeki mürettebata zarar verir veya mevcut mühimmatı tutuşturarak tankın tamamen imha olmasına sebep olur [18].

## 1.2 Zırh Çeşitleri

Zırhlı araçlarda kullanılan çok çeşitli yapı ve geometride zırhlar mevcuttur. İkinci dünya savaşı sırasında büyük gelişme kaydeden zırh teknolojisi başlarda kalın ve döküm çelikten oluşurken daha sonraları zırhın eğiminin anti tank mühimmatının etkisini azalttığı anlaşılmıştır. Soğuk savaş döneminde de gelişen anti tank teknolojisi çok kalın veya eğimli zırhlarında delinebileceğini göstermiştir. Günümüzde kullanılan ve halen geliştirilmekte olan çok sayıda zırh çeşidi vardır.

Homojen zırh, ilk tanklarda kullanıldığı üzere çelik alaşımlarından oluşturulmuştur. İlk tasarlanan bazı kinetik mühimmatlara karşı direnç gösterebilse de kimyasal tepkimeye giren mühimmatlara karşı zayıftır. Kimyasal veya yeni tasarlanan kinetik enerjili tüm mühimmatlara direnç gösterebilir. Penetrasyon (delme) değerleri yeterli olan tüm mühimmatlar etki edebilmektedir. Özellikle HEAT mühimmatlar şok etkisiyle tankın iç duvarlarında kırılma ve parçalanmalara neden olarak şarapnel etkisi

oluşturur [19]. TSK envanterindeki M48a5t1-M48a5t2, M60a1-a3, M60T Sabra tankları bu zırhı kullanmaktadır.

Boşluklu zırh, ana ve iç zırh olmak üzere iki parçadır. İki zırh arasında hava veya sıvı vardır ve mühimmat isabet ettiğinde birinci zırh delse dahi ikinci katmana ulaşana kadar deliciliğini yitirir. Kornet benzeri Tandem (çift başlıklı) anti-tank mühimmatları boşluklu zırha karşı etkilidir. Birinci başlık isabet anında infilak eder ve birinci zırhta delik açar, ardından ikinci tapanın infilak eder ve zırhı tamamen yırtarak tesir eder [20]. Bu zırha HEAT mermiler etki etmemektedir. TSK envanterindeki Leopard I serisi tanklar bu zırhı kullanmaktadır.

Reaktif zırh, ana zırh üzerine, içerisinde patlayıcı bulunan kapsüller giydirilerek oluşturulan bir zırhtır. Anti-tank mühimmatı tankın reaktif zırh plakaları bulunan bölümüne isabet ettiğinde ana zırhtan önce ERA plakalarına çarpar ve kapsülün içindeki patlayıcı infilak eder. Patlayıcının infilak etmesiyle birlikte anti tank mühimmatı da ana zırha zarar vermeden imha olmuş olur. Tandem başlıklı Anti tank mühimmatları ERA kapsüllerini imha ettikten sonra ana zırha da etki ederek tankı delebilmektedir[21]. Özellikle Fırat Kalkanı harekâtında M60T Sabra tankları reaktif zırhı sayesinde kendisini ispatlamıştır.

Kompozit zırh, yeni ve dayanıklı zırh ihtiyacı sonucunda ilk olarak İngiliz ordusu için kompozit zırh isminde, birden çok maddenin kullanılmasıyla oluşturulmuş yeni tip bir zırh çeşididir [22]. Kompozit zırh, en az iki farklı doğal maddenin, 3 boyutlu olacak şekilde kimyasal tepkime olmaksızın belirli ara yüzeylerle birleştirilmesiyle oluşur. Kompozit zırhın amacı, farklı tehditlere direnç gösterebilen maddelerin üstün özelliklerini kullanmak için bu malzemeleri bir araya getirmektir. Kompozit zırhlar klasik dökme çelikten oluşturulan zırha göre %70 daha hafiftir ve çok daha fazla mukavemet gösterebilir. Bunun yanında çeliğin aksine elastisite modülleri daha yüksek olduğundan kırılma ve çatlamalara karşı dayanıklıdır. Yüksek hızda ve ağırlıkta çarpma olaylarında şok dalgasına direnç gösterir ve gelen enerjiyi emmek

yerine dağıtarak absorbe eder. Kompozit zırhların içinde kullanılan (ABD: seyreltilmiş uranyum- İngiltere: seramik vb) malzemeler günümüz anti tank mühimmatlarının erimiş bakır gibi malzemelerin uyguladığı yüksek sıcaklıkla delme tehdidini bertaraf etmek için sıcaklığa direnç gösterecek şekilde dizayn edilmiştir. Kompozit zırhlar çelik zırhın aksine korozyona karşı direnç gösterir.

Kompozit zırhın avantajları olduğu gibi dezavantajları da mevcuttur. Normal çelik döküm zırhlara nazaran çok daha maliyetli ve geliştirilmesi zor ve uzun Ar-Ge süreci gerektirir. APFSDS kod isimli, kısaca SABOT olarak bilinen tank mühimmatları kompozit zırha karşı etkilidir. Kinetik enerjili mühimmat içinde bulunan tungsten veya uranyum penetrator ile tankın zırhında aşırı ısı ile ortalama bir santimetrekare delik açıp tankın içinde şarapnel etkisi yapar ve personel veya teçhizata zarar verir [23]. TSK envanterinde bulunan Leopard 2A4 bu zırhı kullanmaktadır.

Türk Silahlı Kuvvetleri, daha kabiliyetli görev icra edebilmek ve personelini koruyabilmek adına eski M48-M60 tanklarının yerine yeni nesil, daha güçlü donanıma sahip bir tank ihtiyacı hissetmiş ve tedarik çalışmalarına başlamıştır. Son olarak milli imkânlarla ve yüksek yerlilik oranıyla yurt içinde üretilecek bir zırh üzerinde karar kılınmış ve ALTAY AMT projesine başlanılmıştır[24]. Altay tankının ihtiyaçlar doğrultusunda geliştirilecek yeni tip bir zırh ile donatılması kararlaştırılmış ve Roketsan tarafından bor karbür zırh üretmiştir. Altay tankı özgün olarak bor maddesinin sert zırh halinde işlenmiş tipi olan Bor Karbür plakaları kompozit zırha entegre edilerek bu zırh üretilmiştir. Klasik zırhların çelik alaşımı 1450 derece ısıya dayanıklılık gösterirken sadece Bor Karbür zırh plakası 2450 derece sıcaklığa kadar dayanıklılık gösterebilmektedir. Bütün halde Bor karbür zırh, normal çelik döküme göre çok daha hafif olması, yüksek sıcaklığa direnç gösterebilmesi (3500C+)-(9.5 mohs) ve yoğun sertlik içermesi sebebiyle tank zırhı teknolojisinde yeni bir çığır açmıştır [25].

### 1.3 Malzeme Modelleri

Malzemelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesi, savunma sanayisinde üretilecek olan araç veya mühimmat için en önemli kriterlerin başında gelmektedir. Savunma sanayisinde özellikle zırh teknolojisinde malzemelerin dayanıklı ve aynı zamanda hafif olması istenir. Malzemelerin gerilme, birim şekil değiştirme eğrileri deneysel yöntemlerle elde edilir. Deneysel yöntemlerin oldukça pahalı olması ve günümüzde hızla gelişen bilgisayar teknolojisi sayesinde malzeme özellikleri bu deney ve testler yerine bilgisayar ortamında modelleme yapılarak numerik yollarla belirli bir yakınsaklıkta elde edilebilir. Mukavemet modelleri malzemenin birim şekil değiştirme hızı, birim şekil değiştirme miktarı ve sıcaklıkla gerçekleşebilecek gerilme oranları gibi özelliklerin hesaplanabilmesine imkân vermektedir. Malzemelerin elastik ve plastik bölgelerdeki davranışları her malzeme için ayrı özel parametreler ile ifade edilir. Her malzeme için farklı olan bu değerler bilgisayar ortamında malzemeye uygulanan kuvvet, sıcaklık vb. gibi yükleme etkisi altında malzemenin davranışının incelenmesine imkân sağlar.

Çalışmada kullanılacak olan Ansys Workbench programı ile bu malzeme modelleri ile birlikte numerik analiz yapılmıştır. Bor kabür ve 4340 çelik malzemelerinin yüksek çarpma hızlarındaki davranışlarının modellenmesi için bir numerik model oluşturulmuş ve elde edilen bu modelin, sonlu elemanlar yöntemi kullanarak uygun malzeme modeli ve yükleme koşulları altında terminal balistik davranışının incelenmesi amaçlanmıştır. Metaller için Johnson-Cook malzeme modeli, seramik tabanlı malzemelerde ise Johnson-Holmquist malzeme modelleri araştırmalarda en sık kullanılan modellerdir. Malzemeleri yüksek deformasyon hızlarında test etmek için birçok metod vardır. Fakat bu metodların hiç biri henüz standart hale gelmemiştir.

#### 1.3.1. Johnson - Cook Malzeme Modeli

Johnson – Cook modeli özellikle metaller için yaygın kullanılan malzeme modeli olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu model malzemenin akma mukavemetini, pekleşme

özelliklerini, yüksek şekil değiştirme sırasındaki davranışını ve yüksek sıcaklık altındaki davranışını ifade eden parametrelerden oluşmaktadır. Bu model malzemenin hem kinematik güçlendirilmesini hem de adyabatik ısıtmasını hesaba katar. Ancak bu modelin malzeme parametrelerinin belirlenmesi güçtür.

Johnson – Cook malzeme modeli ampirik bir formülden oluşmaktadır. Johnson-Cook modeli malzemelerin uzama oranlarının, ısı genleşmelerinin ve uzama sertleşmelerinin etkilerini içerir [26]. Johnson-Cook modelinin oluşturulabilmesi için 3 basma deneyine ihtiyaç vardır. Bunlar;

- Oda sıcaklığında Quasi-statik test
- Yüksek sıcaklıklarda Quasi-statik test
- Oda sıcaklığında dinamik test [27].

Modeli ifade eden genel denklem aşağıda verilmiştir;

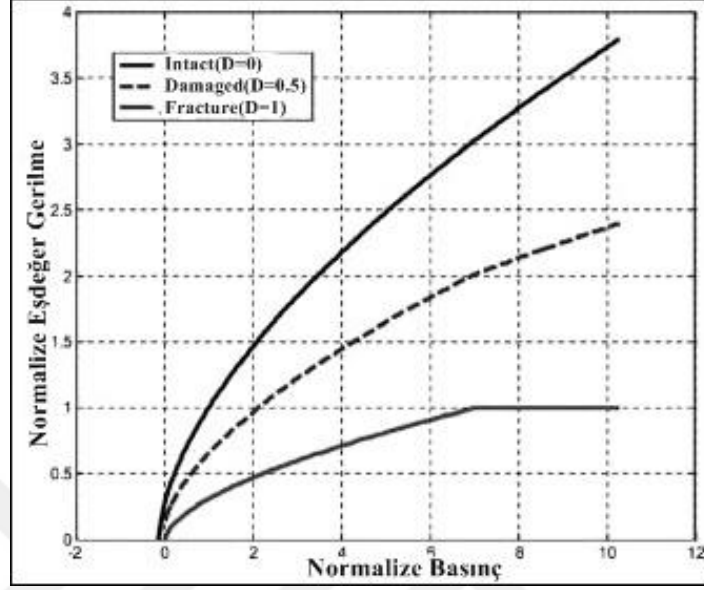
$$\sigma_y = \left[ C_1 + C_2 (\varepsilon_{eff}^p)^N \right] \left( 1 + C_3 \ln \left( \frac{\varepsilon_{eff}^p}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right) \left[ 1 - \left( \frac{T - T_R}{T_M - T_R} \right)^M \right] \quad (1)$$

Denklemdaki  $\varepsilon_{eff}^p$  efektif plastik uzamayı,  $T_M$  erime sıcaklığını,  $T_R$  referans sıcaklığı,  $C_1, C_2, C_3, M$  ve  $N$  malzeme sabitleri olup  $T_R$  sıcaklığında elde edilen değerlerdir.  $\dot{\varepsilon}_0$  ise referans uzama oranıdır

### 1.3.2 Johnson-Holmquist Malzeme Modeli

Johnson ve Holmquist seramik ve beton gibi kırılabilir malzemeler ile takviye edilen zırh tasarımlarının darbe yükleri karşısındaki deformasyon davranışını incelemek için JH-1 ve JH-2 modellerini tasarlamıştır [28]. JH modeli kırılabilir malzemelerin deformasyon davranışlarını tanımlamada iki farklı gerilme değerini kullanır. Bunlardan biri malzemenin deformasyona uğramamış haldeki eşdeğer gerilmesi iken diğer gerilme değeri ise deformasyon oluşumundan sonra ölçülen eşdeğer gerilmedir. İlk olarak JH-1 olarak tasarlanan model daha sonra yazarları tarafından JH-2 olarak geliştirilmiştir [29]. JH-2 modelinin en önemli özelliği kuvvet kaynaklı gerilmeyi,

hasar ve kırılmayı, deformasyondan sonraki kuvveti, burkulma ve uzama oranlarını içermesidir. JH-2 modeli yüksek hızda kırılğan malzemelerin hasar davranışlarını modellemede literatür de yaygın olarak kullanılmaktadır [30-33].



Şekil 1. JH-2 Modelinin Hasar Tanımlaması [34].

Normalize eşdeğer gerilme Şekil 1. de tanımlandığı üzere;

$$\sigma = \sigma'_i - D(\sigma'_i - \sigma'_f) \quad (2)$$

Burada  $\sigma'_i$  ilk durumdaki gerilme ,  $\sigma'_f$  hasar durumundaki gerilme,  $D$  hasar faktörüdür ( $0 < D < 1$ ) [30].

$$\sigma'_i = A(P^* + T^*)^N(1 + \ln e'^*) \quad (3)$$

$$\sigma'_f = B(P^*)^M(1 + C \ln e'^*) \quad (4)$$

$A, B, C, M$  ve  $N$  sabit değerleri olup,  $P^*$  normalize basınç gerilmesini,  $T^*$  ise maksimum hidrostatik çekme gerilmesini ifade eder.  $e'^*$  ise birimsiz uzama oranını gösterir;

$$e'^* = \frac{e'}{e'_{0}} \quad (5)$$

$$D = \sum \frac{\Delta e_p}{e'_f} \quad (6)$$

$$e_p = D_1(P^* + T^*)^{D_2} \quad (7)$$



$D_1, D_2$  malzeme sabitleridir.

$$P = K_1\dot{c} + K_2\dot{c}^2 + K_3\dot{c}^3 \quad (8)$$

P hidrostatik gerilme,  $K_1$  bulk modülü,  $K_2, K_3$  malzeme sabitleri,  $\dot{c}$  sıkıştırılabilirlik faktörüdür. Hasar oluşumundan sonra ( $D>0$ ) burkulma söz konusudur. Basınç artışının eklenmesiyle birlikte;

$$P = K_1\dot{c} + K_2\dot{c}^2 + K_3\dot{c}^3 + \Delta P \quad (9)$$

$$\Delta P = 0, D = 0 \quad (10)$$

$$\Delta P = \Delta P_{maks} \quad (11)$$

$$D = 1 \quad (12)$$

JH-2 modeli malzemeyi 3 farklı hasar durumu içinde inceler. Bunlar ( $D=0$ ) hasarsız, ( $D=0,5$ ) hasarlı ve ( $D=1$ ) kırılmadır. JH-2 modelinin ana fikri hasarlar oluşmaya başladığında ( $D>0$ ) malzemenin yumuşamaya başlayacağıdır.

#### 1.4 Tezin Amacı ve Önemi

Kara savaşlarının en önemli unsurlarından olan tanklar, dünyada sayılı ülkenin üretebildiği savaş araçlarıdır. Son yıllarda da ülkemiz Altay tankı ile bu ülkelerin arasına katılmıştır. Bu tez çalışmasında, Altay tankında kullanılması düşünülen bor karpit zırhının dayanımı hakkında bilgi sahip olmak ve aynı zamanda tungsten alaşımli kinetik enerjili mühimmatın bor karpit zırh karşısındaki performansını incelemek amacıyla yapılmıştır. Farklı açılardaki çarpışma analizleri ile mühimmatın zırha çarpma açısının mühimmat ve zırhtaki deformasyon üzerine etkisi incelenmiştir. Bu çalışmayla gerek zırh gerekse anti tank mühimmatlarının gelişimine katkı sağlamak amaçlanmıştır.

## BÖLÜM 2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Literatürdeki çalışmalar incelenerek bir numerik analizde bulunması gereken standart özellikler aşağıdaki gibi belirlenmiş olup bu özelliklere uygun olarak tez çalışması için bir iş planı ortaya koyulmuştur. Yapılan analizler NATO STANAG 4569, NATO AEP-55 vol 1, standartlarına uygun olarak yapılmıştır.

- Mühimmat ve zırhın geometrisinin oluşturulması
- Malzeme parametrelerin belirlenmesi
- Katı modelin oluşturulması
- Numerik Analizlerin yapılması
- Analizlere ait sonuçların irdelenmesi

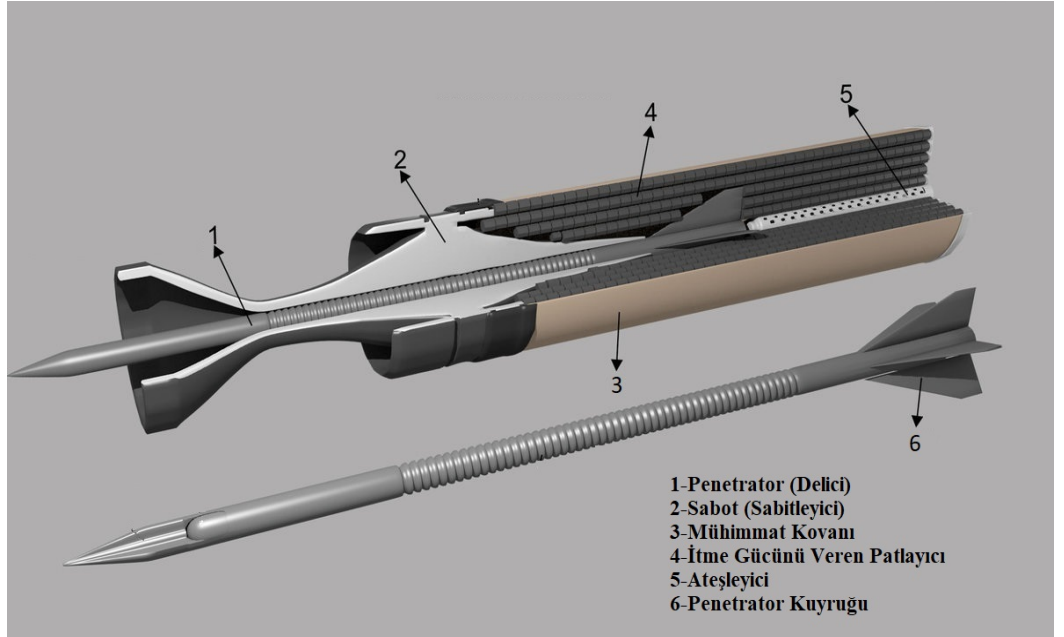
### 2.1 Mühimmat ve Zırhın Geometrisinin Oluşturulması

Günümüzde kullanılan çeşitli geometrilere kinetik enerjili mühimmat vardır. Mühimmat tasarımı yapılırken ilk önce dikkat edilecek parametre mühimmatın ateşleneceği tankın namlu kalibresidir. Günümüzde batı ülkeleri halen ürettikleri tanklarda 105/120mm namlu kullanırken, doğu bloğu ülkeleri tarafından üretilen tanklarda 115/125mm dir. Yakın gelecekte modernize edilecek ara nesil tanklarda tank topu çaplarını 105mm den 120mm ‘ ye veya 115mm den 125mm ‘ ye çıkarılması beklenmektedir. Bununla birlikte hem ömür uzunluğu hem bakım aralığının kısalığı sebebiyle yivli olan tank namluları yerini yivsiz namlulara bırakmaktadır.

Namlu alanlarındaki çalışmaların bir örneğinde 105, 120, 140mm lik kalibreler için elde edilen penetrasyon ve mermi namlu hızı arasındaki ilişkiyi incelemiştir. Homojen çelik hedeflerinde penetrasyon elde etmek için optimum çap boy oranını elde etmeye çalışmıştır [35].

Kinetik enerjili mühimmatı oluşturan ana kısımlar Şekil 2 de gösterilmiştir. Kinetik enerjili mühimmatı altı ana kısım üzerinde toplamak mümkündür.

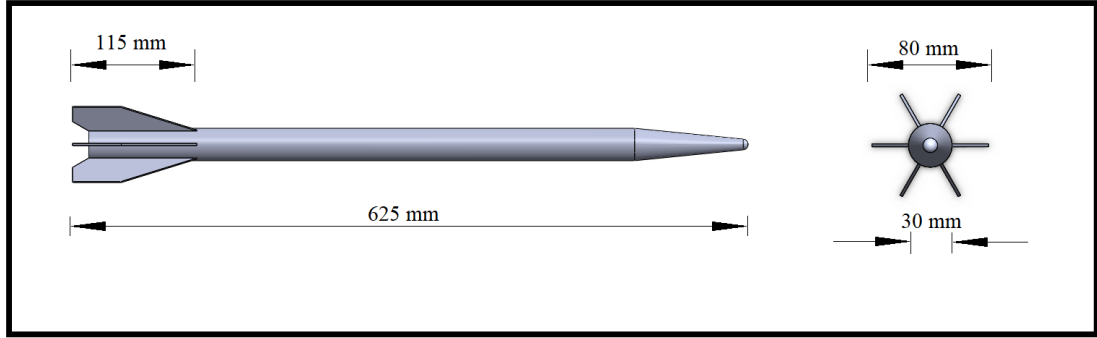
- Penetrator; delme işlemini gerçekleştiren kısımdır. Genellikle mukavemeti yüksek olan materyallerden üretilir. Günümüzde en çok seyreltilmiş uranyum ve tungsten alaşımları kullanılmaktadır.
- Sabot; penetratorun kovanla sabitlenmesine olanak veren kısımdır. Ateşlemeden sonra penetratorun namludan doğrusal bir şekilde hareket ederek havada doğrusal şekilde ilerlemesini sağlar ve bu sayede hedefin doğru hassasiyetle vurulmasını sağlar. Ateşlemeden kısa bir süre sonra penetratordan ayrılır.
- Mühimmat kovanı; mühimmatın içindeki parçaların bir arada durmasını sağlayan kısımdır.
- Barut; ateşleyici ile ortaya çıkardığı kimyasal enerji sayesinde penetratorün yüksek kinetik enerji elde etmesini sağlayan materyaldir
- Ateşleyici; barutun ateşlenmesini sağlayan kısımdır
- Penetrator kuyruğu; penetratorun havada doğrusal yol almasını sağlayan kısımdır



Şekil 2. Kinetik Enerjili Mühimmatın Yapısı [36]

### 2.1.1 Tasarlanan Mühimmat Geometrisi

Kinetik enerjili mühimmatın ateşlemeden sonraki zırha olan terminal balistiği inceleneceğinden kinetik enerjili mühimmatın sadece penetrator (delici) kısmının tasarımı Solidworks programında tasarlanmıştır. Penetrator uzunluğu 625mm, çapı 30mm olarak tasarlanmıştır. Penetratorun çap boy oranının  $l/d=20$  olarak tasarlanmıştır [35]. Solidworks (2016 x64 edition, Dassault Systemes SolidWorks Corporation 175 Wyman Street Waltham, MA 02451) programında tasarlanan penetrator geometrisi bir bütün olarak ele alınarak kuyruk ve uç kısım ayrımı yapılmadan bütün kısımlarının aynı homojen malzemeden (tungsten alaşım) üretildiği kabul edilmiştir. Kuyruk yapısı altı kanatçık olacak şekilde en geniş kısmının çapı 80mm, kuyruk uzunluğu 115mm dir. Kanatçıkların kalınlığı 2mm dir. Penetratorün delme işleminde temas edecek ilk noktası olan uç kısmının uzunluğu 105mm dir. Penetrator geometrisi Şekil 3 de verilmiştir.

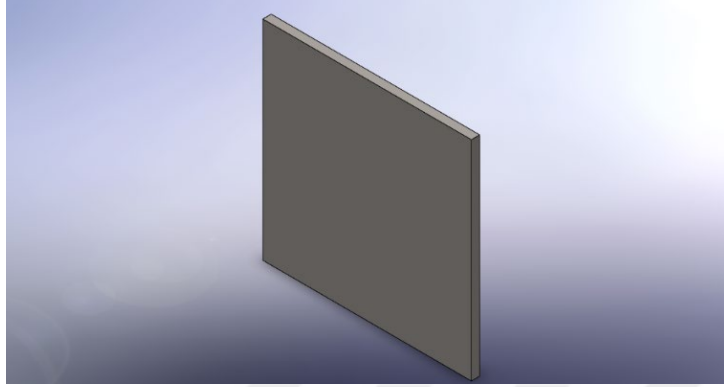


Şekil 3. Tasarlanan Penetrator Geometrisi

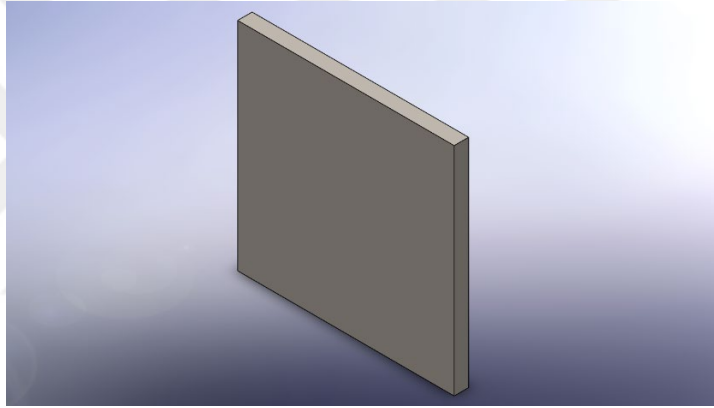
### 2.1.2 Tasarlanan Zırh Geometrileri

Yapılan çalışmalarda kinetik enerjili mühimmatın etki edeceği zırh iki katmandan oluşacak şekilde tasarlanmıştır. İki katman birbiriyle yapışık olacak şekilde, ön taraftaki zırh seramik tabanlı (bor karbür) zırh, arka taraftaki ise metal (4340 çelik) materyalden oluşan zırhtır. Ön taraftaki seramik tabanlı zırhın kalınlığı 30mm yüksekliği 750mm, genişliği 750mm düz bir levha şeklinde alınmıştır. Tasarlanan

seramik tabanlı zırh Şekil 4 te gösterilmiştir. Arka taraftaki metal zırhın kalınlığı 50mm yüksekliği ve genişliği ön taraftaki seramik tabanlı zırhla aynı olup 750mm dir. Tasarlanan metal zırh Şekil 5 te gösterilmiştir.

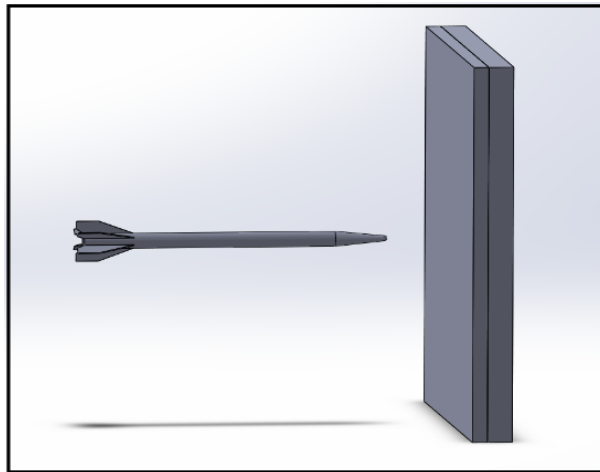


Şekil 4. Tasarlanan Bor Karbür Zırhı



Şekil 5. Tasarlanan 4340 Çelik Zırh

Tasarlanan parçalar bir araya getirilip montajı yapıldığında modelin son hali Şekil 6 da gösterilmiştir.



Şekil 6. Modelin Montajlı Hali

## 2.2 Malzeme Modeli ve Modele Ait Parametrelerin Belirlenmesi

Günümüzde üretilen kinetik enerjili mühimmatların büyük bir kısmı penetrator malzemesi için seyreltilmiş uranyum veya tungsten alaşımları kullanılmaktadır. Seyreltilmiş uranyum çok yüksek mukavemette olması bu mühimmat türü için gereken şartları sağlasa da gerek taşınma ve depolama esnasında gerek kullanım sonrasında sağlığa zararlı yan etkilerinin olması nedeniyle sorun teşkil etmektedir. Tungsten alaşımları ise yine seyreltilmiş uranyum gibi çok yüksek mukavemet değerleri taşıması ve seyreltilmiş uranyum gibi zararlı yan sebepler oluşturmaması sebebiyle bu tez çalışmasında penetrator malzemesi olarak seçilmiştir. Analizde kullanmak için gerekli tungsten alaşım değerleri ve metal için deformasyonlarının analizinde kullanılan Johnson-Cook parametreleri tablo 1 de verilmiştir [37].

Tablo 1. Tungsten Alaşımı için Değer ve Parametreler [37]

Tungsten Alaşım Malzeme Parametreleri			
Yoğunluk	17000 $kg\ m^{-3}$		
Özgül Isı Sabit Basıncı	134 $Jkg^{-1}\ C^{-1}$		
Kayma Modülü	1,6e+011 $Pa$		
Tungsten Alaşım Johnson Cook Parametreleri			
Başlangıç Akma Gerilmesi	Sertleşme sabiti	Sertleşme üsteli	Gerilme Oranı Sabiti
1,506e+009 $Pa$	1,77e+008 $Pa$	0,12	1,6e-002
Termal Yumuşama Üsteli	Erime Sıcaklığı	Referans Gerilme Oranı	
1	1449,8 $^{\circ}C$	1 $s^{-1}$	

Tez çalışmasında kullanılması düşünülen seramik tabanlı kompozit zırh olan bor karbür, hafifliği, ısıya yüksek oranda dayanabilmesi ve yüksek mukavemeti sebebiyle ileride birçok zırhlı araçlarda görmemiz mümkündür. Bu tez çalışmasında yapılacak olan analizlerde, bor karbürün seramik tabanlı olmasından dolayı Johnson-Holmquist malzeme modeli esas alınacaktır. Bor karbürün numerik analiz için gerekli malzeme parametreleri ve Johnson-Holmquist modeli için gerekli parametreleri tablo 2 de verilmiştir [38].

Numerik analiz için tasarlanan ikinci zırh ise metal malzeme olan 4340 çeliktir. Tungsten alaşımı gibi metal materyal olması nedeniyle analizde 4340 çelik için de Johnson-Cook malzeme modeli kullanılmıştır. Tablo 3 te 4340 çelik için genel malzeme parametreleri ve Johnson-Cook parametreleri verilmiştir [39].

Tablo 2. Bor Karbür Malzeme ve Johnson-Holmquist modeli değerleri [38]

Bor Karbür Malzeme Parametreleri			
Yoğunluk	2516 $kg\ m^{-3}$		
Kayma Modülü	1,99e+011 $Pa$		
Bor Karbür Johnson-Holmquist Parametreleri			
Hugonoit Elastik Limit, HEL	Bozulmamış Güç Sabiti, A	Bozulmamış Güç Üsteli, N	Gerilme Oranı Sabiti, C
1,25e+010 $Pa$	0,987	0,77	2,7e-0,02
Kırılma Gücü Sabiti, B	Kırılma Gücü Üsteli, m	Maksimum Kırılma Gücü Oranı, SFMAX	Hidrodinamik Gerilim Limiti, T Pa
0,5	1	0,15	-7,3e+009 $Pa$
Hasar Sabiti, D1	Hasar Sabiti, D2		Hacim Sabiti, B
0,1	1		1

Tablo 3. 4340 Çelik Malzeme ve Johnson-Cook Parametreleri [39]

4340 Çelik Malzeme Parametreleri			
Yoğunluk	7830 $kg\ m^{-3}$		
Özgül Isı Sabit Basıncı	477 $Jkg^{-1}\ C^{-1}$		
Kayma Modülü	8,18e+010 $Pa$		
4340 Çelik Johnson Cook Parametreleri			
Başlangıç Akma Gerilmesi	Sertleşme sabiti	Sertleşme üsteli	Gerilme Oranı Sabiti
7,92e+008 $Pa$	5,1e+008 $Pa$	0,26	1,4e-002
Termal Yumuşama Üsteli	Erime Sıcaklığı	Referans Gerilme Oranı	
1,03	1519,8 $^{\circ}C$	1 $s^{-1}$	

### 2.3 Katı Modelinin Doğrulanması

Analiz için Ansys Workbench (2019, 19,1 ANSYS Inc. Southpointe 2600 ANSYS Drive Canonsburg PA 15317 USA) programı kullanılmıştır. Tasarlanan model, analiz için Ansys Workbench programına aktarılmıştır. Öncelikle modelde olması gereken en uygun üç boyutlu eleman sayısı üzerinde çalışılmıştır. Çalışmalarının temel sorgularından biri olan eleman sayısı yakınsama hassasiyeti için büyük önem taşımaktadır. Eleman boyutları değişimine karşı oluşan enerji hatası dikkate alınarak optimum eleman sayısı bulunmaya çalışılmıştır. İlk önce eleman boyutu olarak 2,5mm daha sonra 3mm, 4mm, 5mm, 7,5mm, 10mm ve 20mm için değerlendirmeye alınmıştır. Şekil 7 de eleman boyutlarına göre hesaplanan enerjinin ve referans enerjisiyle karşılaştırılması verilmiştir.

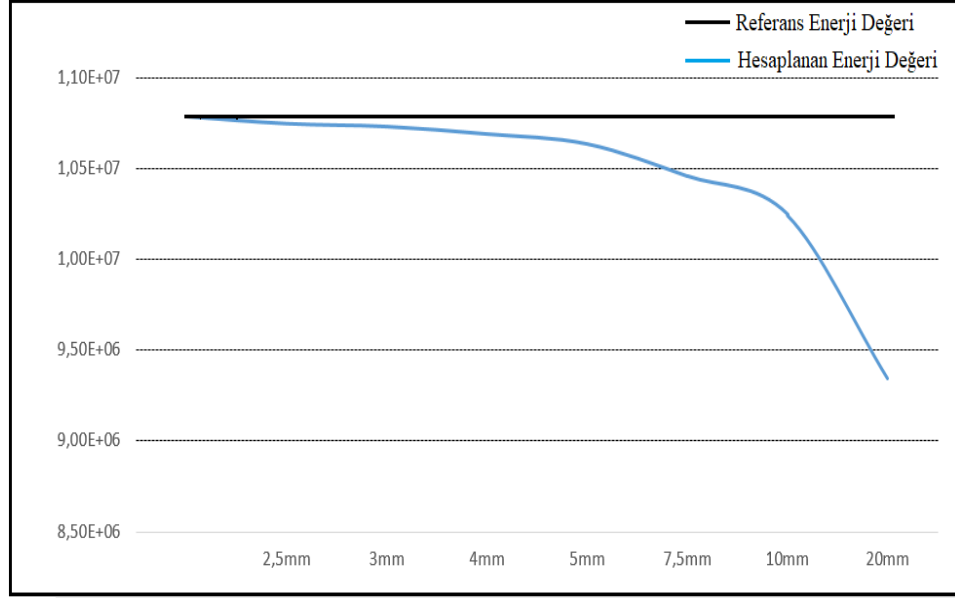
$$E_{(toplamlarnerji)} = \frac{1}{2} m v^2 \quad (13)$$

Enerji denkleminde  $m$  kütleyi,  $v$  ise hızı temsil eder. Analizde eleman sayısına göre enerji hatası dikkate alınacağından,  $m$  kütlesi olarak tungsten alaşımli penetratorün öz kütlesi  $17000kg/m^3$  olduğundan, tasarlanan hacmi yardımıyla kütlesi  $7,0453kg$  olarak alınmıştır. Hızı ise analizde kinetik enerji mühimmatların etki alanları dikkate alınarak  $1750m/s$  olarak alınmıştır[40]. Böylece;

$$E = \frac{1}{2} (7,0453)(1750)^2 \quad (13.1)$$

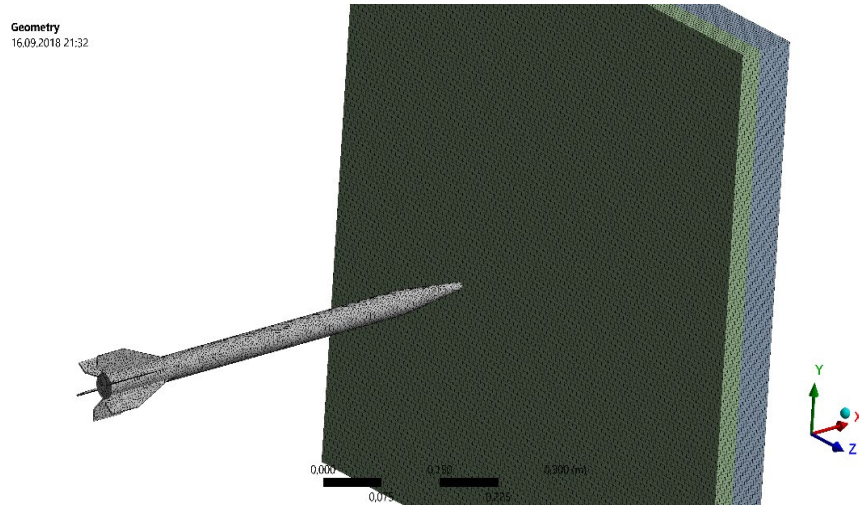
$$E = 1,0788115e + 7 \text{ kgm/s}^2 \quad (13.2)$$





Şekil 7. Eleman Boyutlarına Göre Hesaplanan Enerjinin Referans Enerji Değeriyle Karşılaştırılması

Sonlu elemanlar analizi yapılırken modelin eleman sayısına bölünmesi yani modelin istenilen hacimde elemanlara bölünmesi modelin hacminin ve kütesinin azalmasına sebebiyet verir. Buda analizdeki enerjinin değişmesine neden olur. En optimum değer ve analiz süresi değerlendirilince, 4mm eleman boyutlu analizde karar kılınmıştır. Eleman boyutlarının 4mm olarak seçilmesiyle penetratorde 58687 eleman, 12890 düğüm noktası, 4340 çelik zırh plakasında 500094 düğüm noktası 459472 eleman, bor karbür zırh plakasında 321489 düğüm noktası 282752 eleman oluşturulmuştur. Modelin elemanlara bölünmesiyle elde edilen görsel Şekil 8 de verilmiştir.

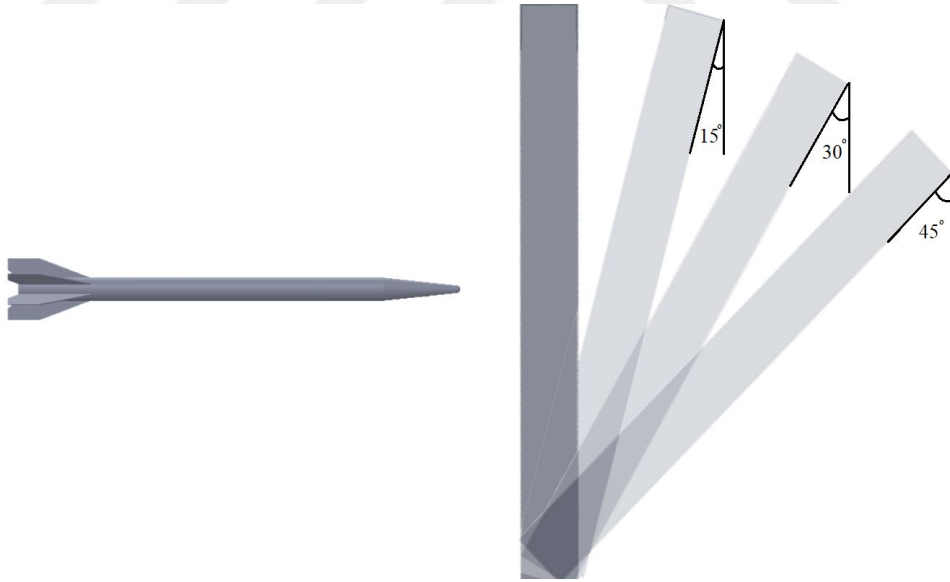


Şekil 8. Modelin 4mm Eleman Boyutlarda Elemanlara Ayrılması

### BÖLÜM 3. SAYISAL ÇALIŞMALAR

Zırhlı araçların sahip olduğu eğimli zırhlar ve savaş alanındaki şartlar göz önüne alındığında penetratorün zırha her zaman dik açıyla çarpması mümkün değildir. Bu nedenle zırh eğiminin 0, 15, 30 ve 45 ve derecedeki açılarda penetratorün çarpmasının numerik analizleri yapılmıştır.

Analizlerde iki zırh plakası arasında boşluk bırakılmamış, zırhlar üst, alt ve yan yüzeylerinden sabitlenmiştir. Penetrator hızı 1750m/s, toplam analiz süresi ise 0,006s olarak kabul edilmiştir. Penetrator önce bor karbür zırh plakasına ardından 4340 çelik zırh plakasına çarpmıştır. Analizlerde penetratorün analiz süresince hız değişimi incelenmiş ayrıca penetrator ve zırhlarda meydana gelen von Mises gerilmeleri değerlendirilmiştir. Penetrasyon sonucu zırhlarda meydana gelen deliklerin büyüklükleri ve gerilmelerin zırhlardaki dağılma bölgeleri incelenmiştir. Farklı açılardaki zırh görseli Şekil 9 da verilmiştir.

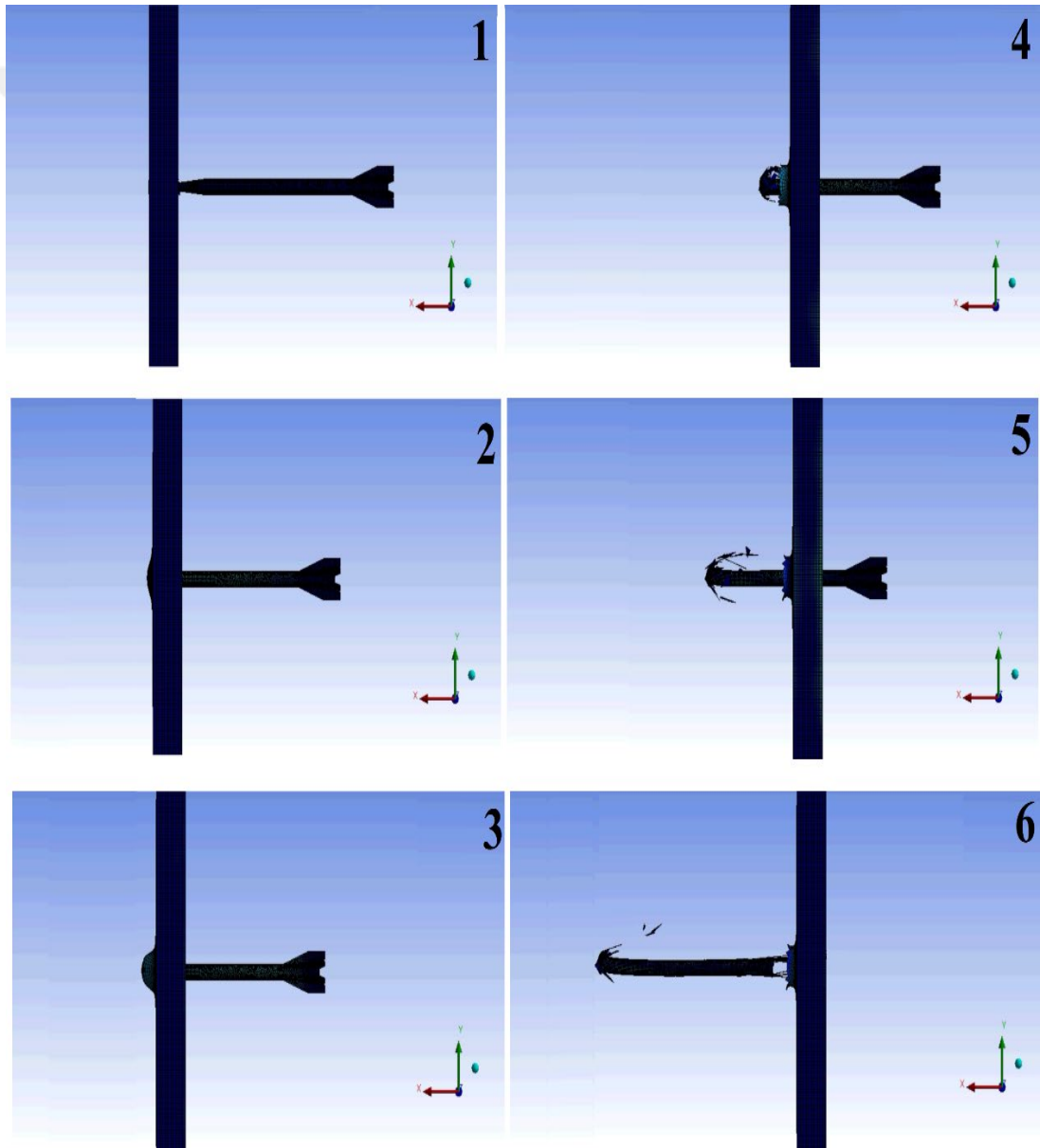


Şekil 9. Penetrator ve Farklı Açılardaki Zırh Görseli

Analizlerde penetratorün sahip olduğu yüksek hızdan dolayı sürtünme etkileri ihmal edilmiştir. Yüzeyin sürtünme katsayısı ve uygulanabilecek yüzey işlemleri sonucunda ulaşılacak sonuçlar çalışmanın devamında yürütülmesi planlanan akademik faaliyetler arasındadır.

### 3.1 Zırh Açısının 0° Olduğu Durumda Çarpışmanın Numerik Analizi

İlk olarak yapılacak olan analiz, penetrator ateşlendikten sonra zırh ile tam olarak 0° açıyla çarpışma durumu olacaktır. Analizin görsel sonuçları adım adım olacak şekilde toplam altı adımda Şekil 10 da verilmiştir. Analiz sonucunda penetratorun çift katmanlı zırhı deldiği görülmüştür. Penetratorde oluşan en büyük deformasyonların uç ve kuyruk kısmının kanatçıklarında olduğu görülmüştür. Analiz sonunda penetratorün hacimsel bütünlüğünü büyük oranda koruduğu görülmüştür.



Şekil 10. 0° Çarpışma İçin Görsel Analiz Sonuçları

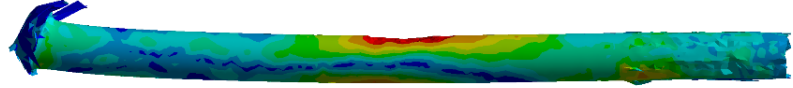
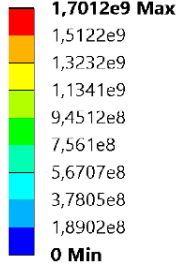
Analiz başlangıcında 1750m/s olan penetrator hızı, analiz sonunda ortalama 1513,6m/s olduğu Tablo 4 te görülebilmektedir. Bu değer penetratorün sahip olduğu hızının yaklaşık %13,5 azaldığını göstermektedir.

Tablo 4. 0° Çarpışma İçin Analiz Süresince Penetrator Hız Tablosu

Zaman [m/s]	Minimum [m/s]	Maksimum [m/s]	Ortalama [m/s]
1,1755e-038	1750	1750	1750
3,0033e-005	1750	1750	1750
6,0036e-005	1750	1750	1750
9,0055e-005	153,75	4862,1	1745,8
1,2002e-004	108,31	4862,1	1710,2
1,5001e-004	30,755	4862,1	1669,8
1,8001e-004	15,448	4862,1	1642
2,1e-004	15,448	4862,1	1631,4
2,4002e-004	15,448	4862,1	1627,8
2,7001e-004	15,448	4862,1	1627,1
3,0001e-004	15,269	4862,1	1627,1
3,3001e-004	13,951	4862,1	1626,8
3,6e-004	13,951	4862,1	1627,8
3,9001e-004	13,951	4862,1	1616,1
4,2e-004	13,951	4862,1	1566,7
4,5e-004	13,951	4862,1	1521,2
4,8e-004	13,951	4862,1	1517,3
5,1e-004	9,2293	4862,1	1515,3
5,4e-004	13,951	4862,1	1514,3
5,7e-004	13,951	4862,1	1513,9
6e-004	10,326	4862,1	1513,6

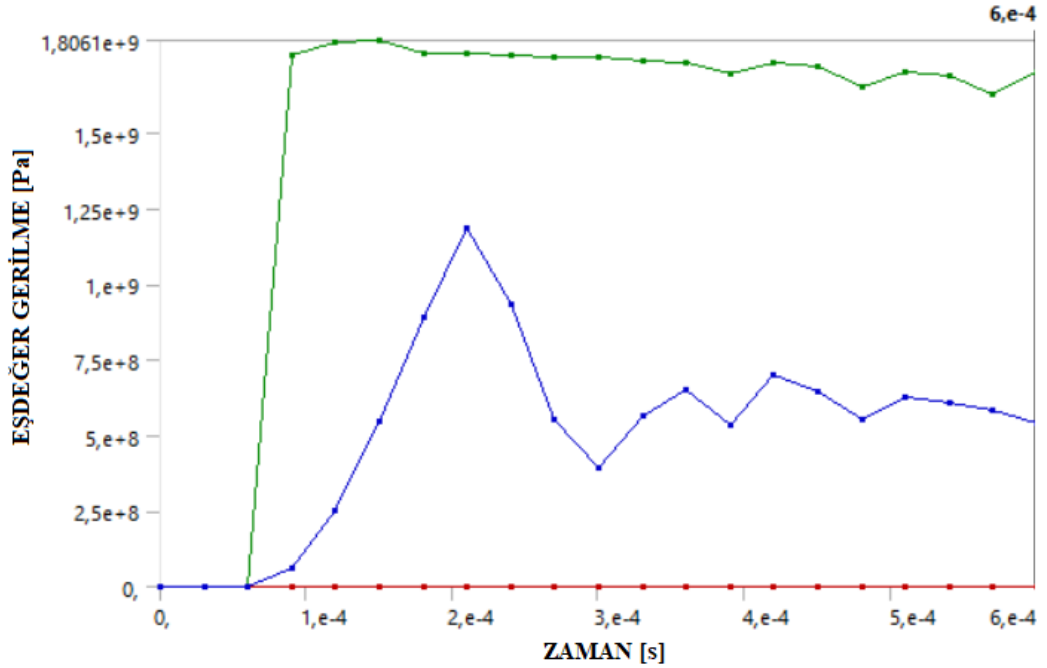
Analiz sonunda penetratorde meydana gelen von Mises gerilmeleri ve deformasyonlar Şekil 11 de verilmiştir. Penetratorün uç ve kuyruk kısmında deformasyonların olduğu, kuyruk kısmındaki kanatçıkların deformasyona uğradığı görülmektedir. Gerilmelerin penetratorün orta noktasında yoğunlaştığı ve yaklaşık 1,7GPa olduğu hesaplanmıştır.

A: Explicit Dynamics  
Equivalent Stress 2  
Type: Equivalent (von-Mises) Stress  
Unit: Pa  
Time: 6.e-004  
Cycle Number: 96086  
26.11.2018 22:20



Şekil 11. 0° Çarpışma İçin Penetratorün Analiz Sonundaki Görseli

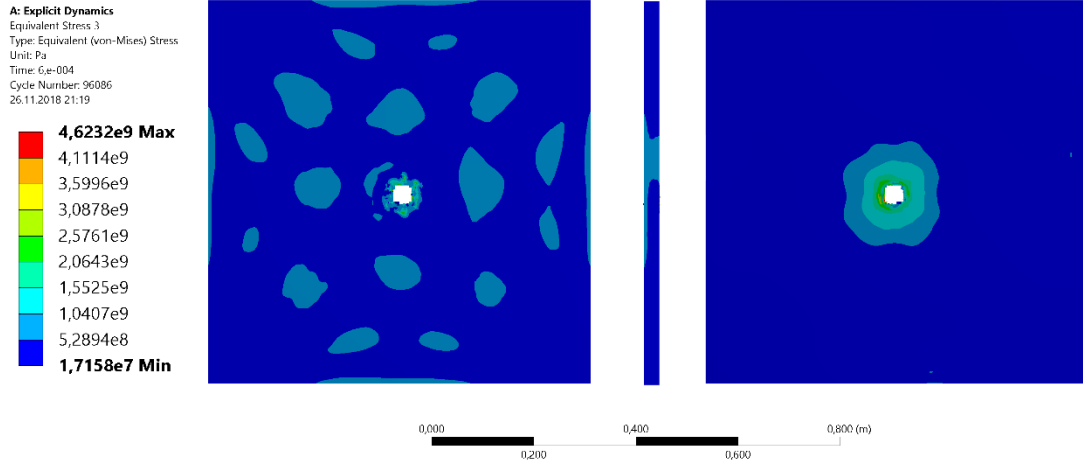
Penetratorde meydana gelen von Mises gerilmelerinin çarpışma zamanına göre değişimi Şekil 12 de verilmiştir. Penetratorde oluşan en yüksek gerilme değerinin penetratorün uç kısmının zırh plakalarına çarptığı anda meydana geldiği görülmüştür.



Şekil 12. 0° Çarpışma İçin Penetrator von Mises Gerilme Grafiği

Bor karbür zırh plakasının analiz sonundaki görseli, sırasıyla ön, yan ve arka yüzey olmak üzere Şekil 13 de verilmiştir. Ön yüzeyinde oluşan gerilmelerin plaka boyunca

dağılım gösterdiği, arka yüzeyinde ise oluşan deliğin etrafında meydana geldiği görülmektedir. Oluşan deliğin genişliği yaklaşık olarak 36mm dir.

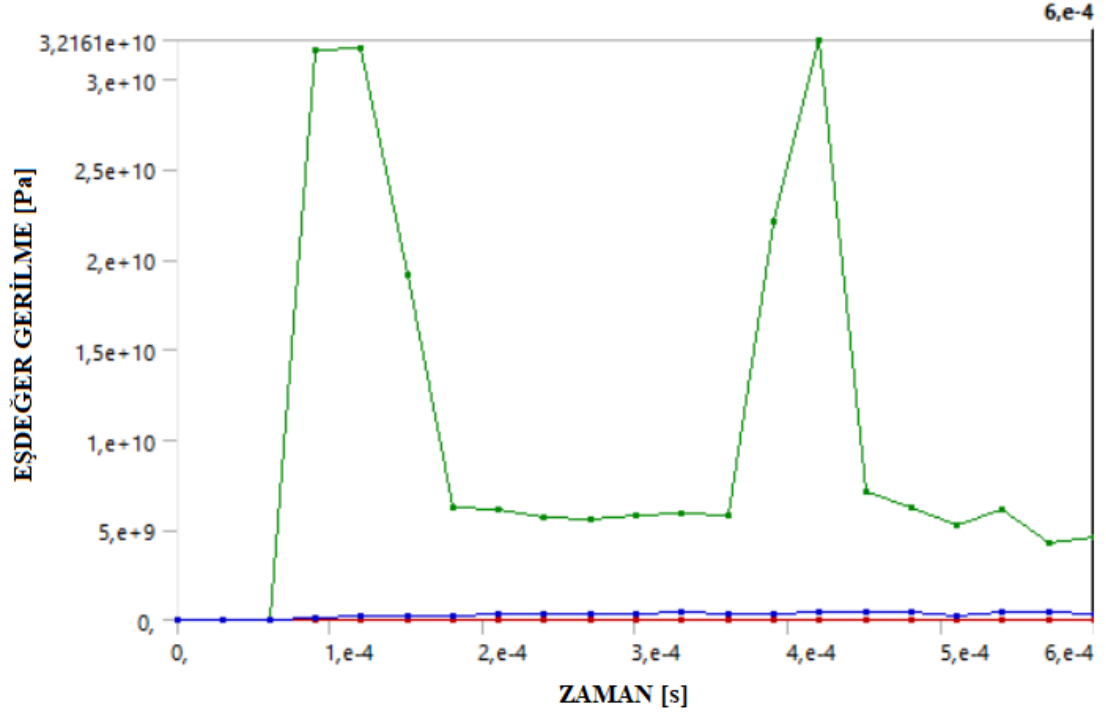


Şekil 13. 0° Çarpışma için Bor Karbür Zırhın Analiz Sonucundaki Görselleri

Analizde, seramik tabanlı bor karbür zırhın penetratorün şiddetine dayanamadığı ve deformasyona uğradığı görülmüştür. Bor karbür zırhtaki eşdeğer gerilimler Şekil 14 te verilmiştir.

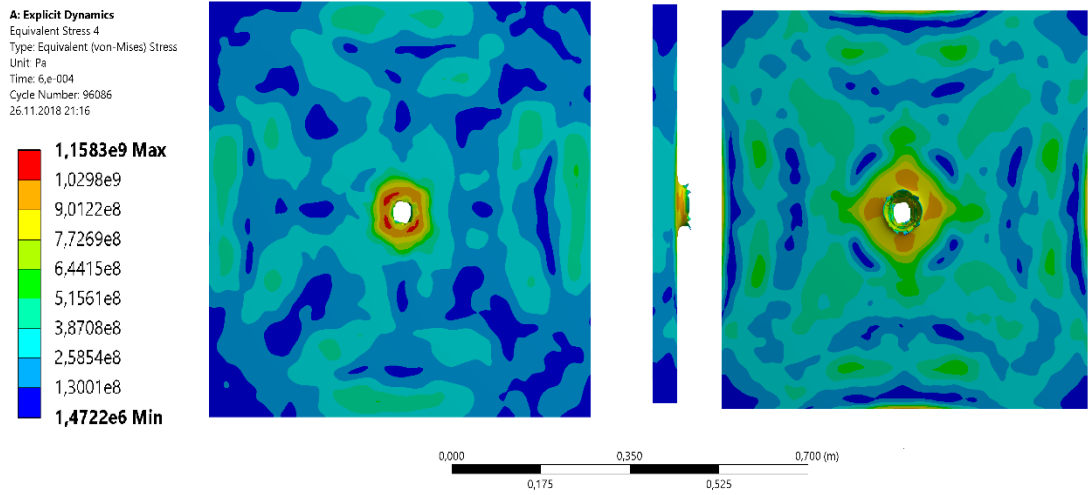
Grafikte en yüksek gerilme değeri yaklaşık 32,2GPa ve 30GPa olarak iki noktada oluşmuştur. İki ayrı noktada yüksek değerlere ulaşmasının sebebi, ilk yüksek gerilme penetratorun zırha çarptığı anda oluşan gerilmedir. İkinci yüksek gerilme değerinin sebebi ise penetrator geometrisinden kaynaklanmaktadır. Penetratorün kuyruk kısmının çapı gövde çapından büyük olması sebebiyle kuyruk kısmındaki kanatçıkların zırha çarpmasından dolayı ikinci gerilme artışı oluşmaktadır.

Gerilme değerlerinin bu kadar yüksek olma sebebi ise hızı ve kütesinden dolayı çok yüksek kinetik enerjiye sahip olan penetratorün uç kısmının zırha etki ettiği alanının çok küçük olmasından kaynaklanmaktadır. Çok kısa zaman içinde oluşan bu gerilme değeri, penetratörün uç kısmının deformasyonun artması sonucu temas alanın artmasından dolayı çarpışma süresince düştüğü görülmüştür.



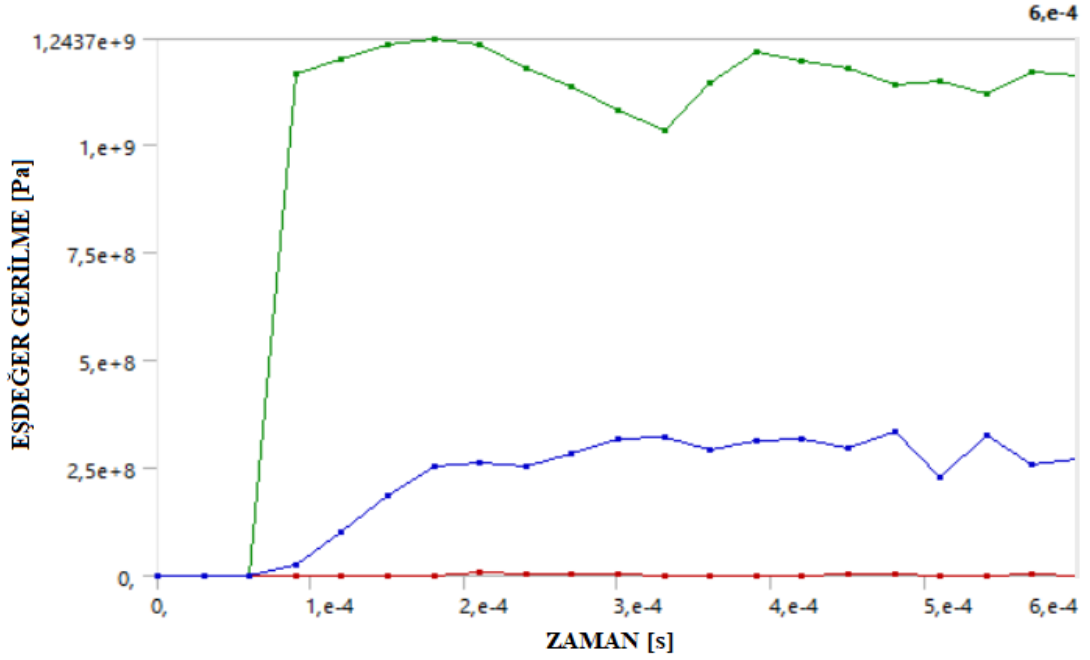
Şekil 14. 0° Çarpışma İçin Bor karbür von Mises Gerilme Grafiği

Elde edilen sonuçlarda 4340 çelik zırh plakasındaki von Mises gerilmeleri ve deformasyonları sırasıyla ön. yan ve arka yüzey olarak Şekil 15 de verilmiştir. Çelik zırhta oluşan deliğin çapı bor karbür zırha paralel olarak yine yaklaşık 36mm dir. Deliğin etrafında gerilmenin yoğunlaştığı daire şeklindeki bölgede en yüksek gerilme yaklaşık 1,16GPa olup bu gerilme alanınının çapı yaklaşık olarak 124mm dir.



Şekil 15. 0° Çarpışma İçin 4340 Çelik Analiz Sonundaki GörSELLERİ

Son katmandaki zırh olan 4340 çelik de deformasyona uğramış olup, penetratorü durduramamıştır. Zırhta meydana gelen von Mises gerilme değişimi Şekil 16 da verilmiştir. Oluşan en yüksek gerilme 1,24GPa dır. Bor karbür zırhta olduğu gibi gerilmenin iki ayrı noktada yükseldiği görülmektedir. Penetratorün önce bor karbür zırha çarptığı için kuyruk kısmında oluşan deformasyon sebebi ile kuyruk kısmının sebep olduğu gerilmenin bor karbürden daha az olduğu görülmektedir.

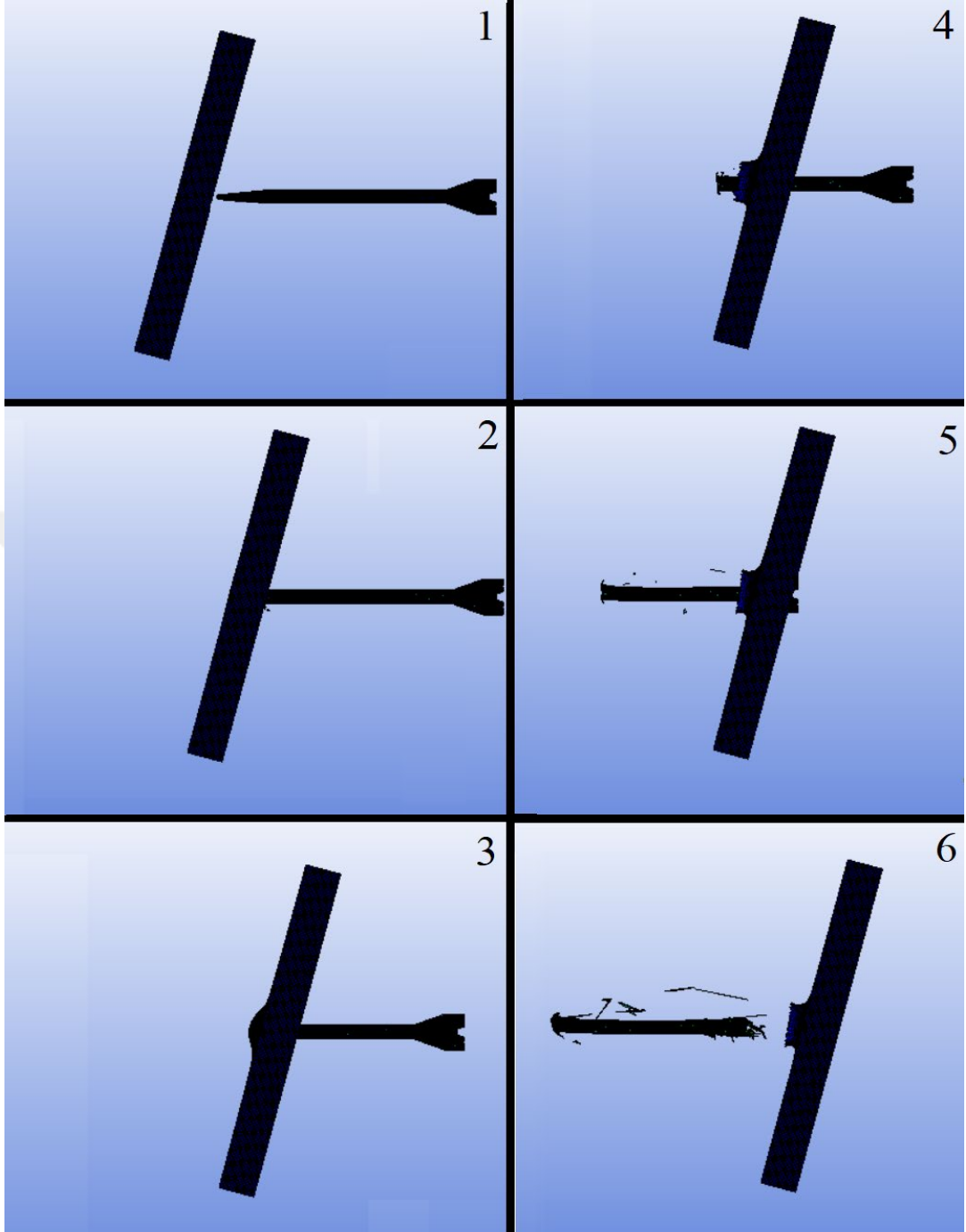


Şekil 16. 0° Çarpışma İçin 4340 Çelik von Mises Gerilme Grafiği

### 3.2 Zırh Açısının 15° Olduğu Durumda Çarpışmanın Numerik Analizi

Çalışmanın bu kısmında zırh açısının 15° olduğu durumun incelenmiştir. Penetrator başlangıç hızı yine 1750m/s olarak alınmıştır. Analiz süresi ise bir önceki analiz gibi 0,006 saniyedir. Analiz sonuçları adım adım olacak şekilde toplam altı adımda Şekil 17 de verilmiştir. 15 derecede çarpışma da yine 0 derecedeki çarpışmada olduğu gibi penetratorün zırhı deldiği görülmüştür. Penetratorun uç kısmındaki deformasyonun arttığı görülmüştür. Eğim açısından dolayı oluşan von Mises gerilmelerinin arttığı da gözlemlenmiştir. Zırhlarda meydana gelen delik çapının 0 derece analizine göre daha büyük olduğu ölçülmüştür.





Şekil 17. 15° Çarpışma İçin Analizin Görsel Sonuçları

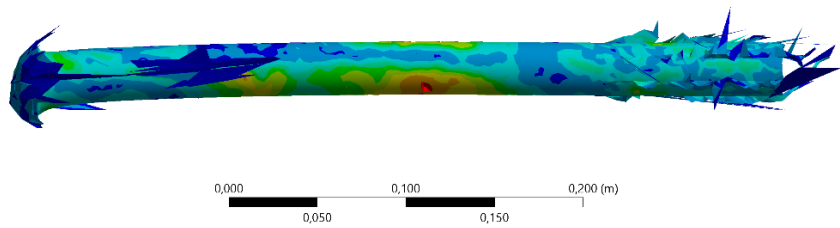
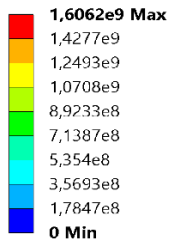
Penetratorun analiz süresince sahip olduğu hız Tablo 5 de verilmiştir. 0 derecelik çarpışmada analiz sonundaki ortalama hız 1513,6m/s iken 15 derecelik çarpışma analizinde 1463m/s olarak hesaplanmıştır. Buradan penetrator hızınının 0 derece çarpışmaya göre yaklaşık olarak %3,34 oranında azaldığı görülmüştür. Penetratordeki deformasyonların çoğunlukla uç ve kuyruk kısmında meydana gelmiştir. Kanatçıkların deformasyona uğradığı görülmüştür.

Tablo 5. 15° Çarpışma İçin Analiz Süresince Penetrator Hızları

Zaman [m/s]	Minumum [m/s]	Maksimum [m/s]	Ortalama [m/s]
1,1755e-038	1750	1750	1750
3,0033e-005	1750	1750	1750
6,0036e-005	1750	1750	1750
9,0039e-005	1750	1750	1750
1,2e-004	99,769	4065,4	1739,6
1,5003e-004	65,203	4065,4	1695,5
1,8001e-004	59,667	4065,4	1643,2
2,1002e-004	33,347	4065,4	1585,4
2,4e-004	11,932	4065,4	1551,1
2,7001e-004	11,932	4065,4	1540
3e-004	10,243	4065,4	1537,9
3,3e-004	10,243	4065,4	1537,2
3,6e-004	5,2852	4065,4	1535,9
3,9e-004	5,2852	4065,4	1534,6
4,2e-004	9,3286	4065,4	1526,6
4,5e-004	9,3286	4065,4	1492,6
4,8e-004	7,8457	4065,4	1469,4
5,1e-004	10,243	4065,4	1466,4
5,4e-004	9,0951	4065,4	1465
5,7e-004	9,0951	4065,4	1463,9
6e-004	9,0951	4065,4	1463

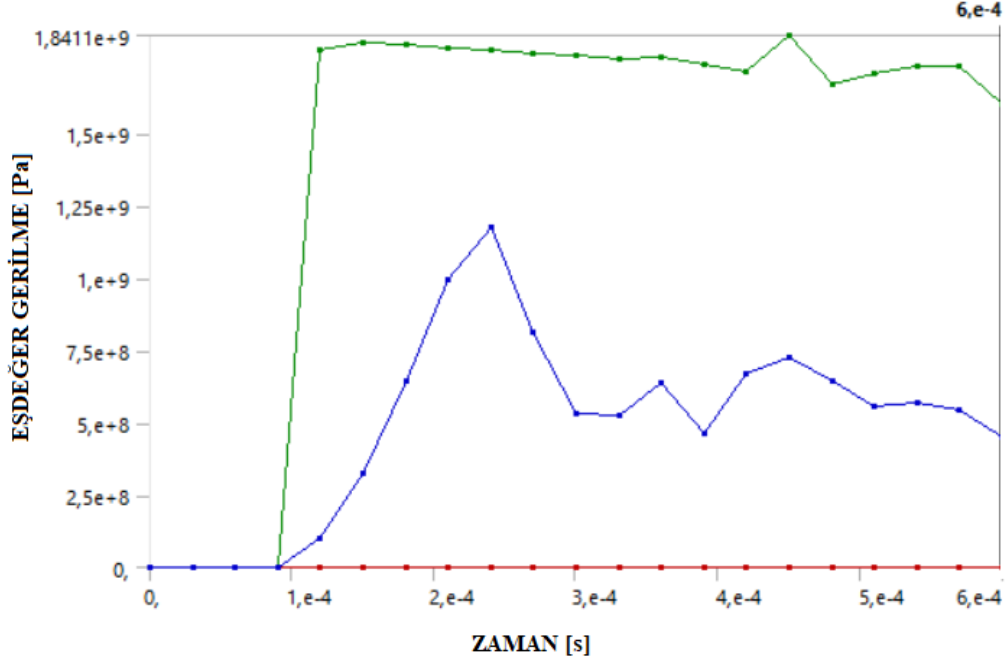
Şekil 18 de görüldüğü üzere analiz sonunda penetratordeki gerilmelerin genellikle orta kısımda toplanmakta olup maksimum gerilme değeri ise yaklaşık 1,60GPa dır.

A: Explicit Dynamics  
 Equivalent Stress 4  
 Type: Equivalent (von-Mises) Stress  
 Unit: Pa  
 Time: 6,e-004  
 Cycle Number: 135517  
 26.11.2018 22:25



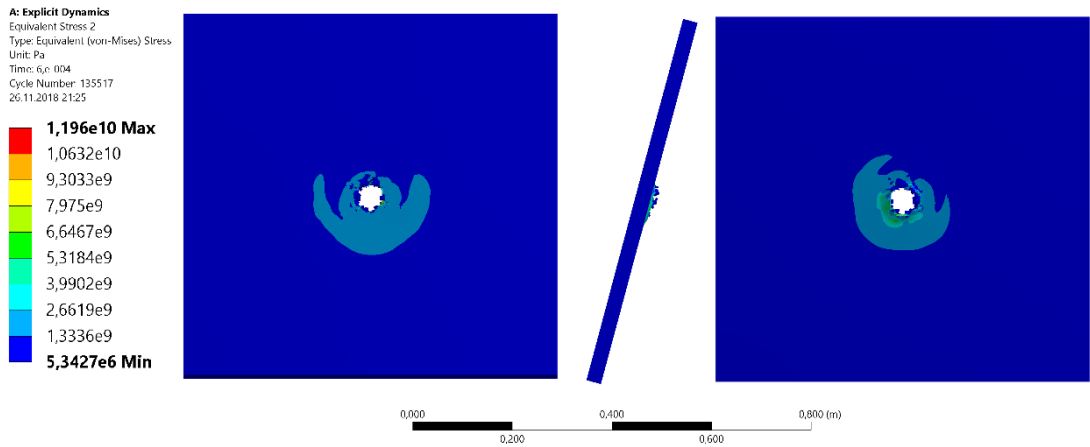
Şekil 18. 15° Çarpışma İçin Penetratorün Analiz Sonundaki Görseli

Penetratörde gerçekleşen deformasyonların arttığı ve en yüksek gerilme değerinin analiz süresi boyunca 1,84GPa olduğu ve meydana gelen diğer gerilmeler Şekil 19 da verilmiştir. 0 derecelik çarpışma analizinde en büyük von Mises gerilme değeri penetratörün zırha çarptığı anda oluşurken, 15 derece analizinde meydana gelen en büyük gerilme değeri penetrator kuyruğundaki kanatçıkların zırha çarptığı anda oluşmuştur.



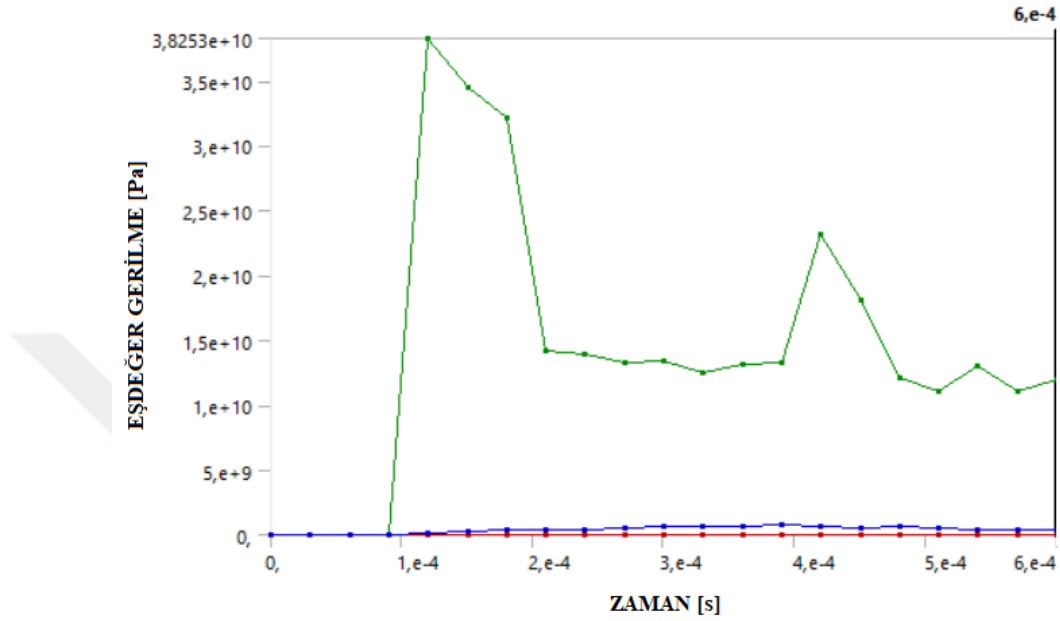
Şekil 19. 15° Çarpışma İçin Penetrator von Mises Gerilme Grafiği

Bor karbürde meydana gelen gerilme ve deformasyonlar sırasıyla ön,yan ve arka olmak üzere Şekil 20 de verilmiştir. Oluşan deliğin çapı yaklaşık olarak 47 mm dir.



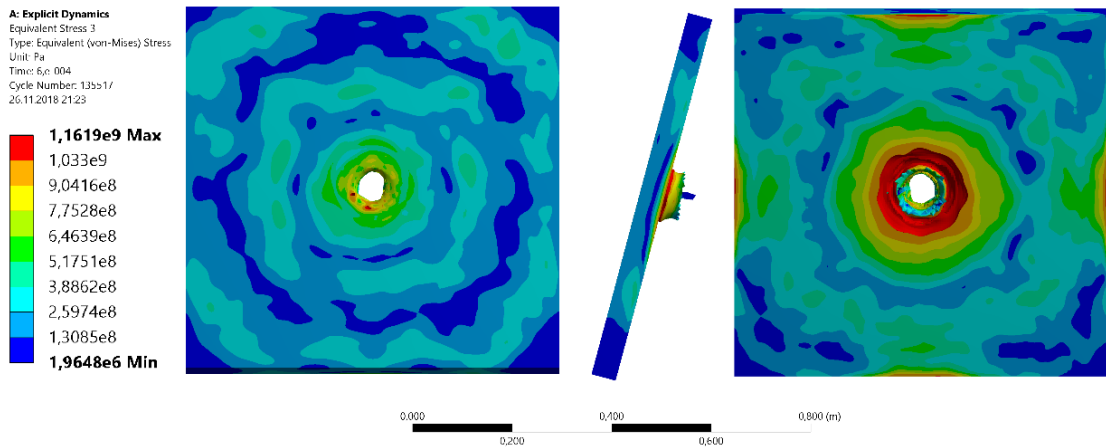
Şekil 20. 15° Çarpışma İçin Bor Karbür Zırh Analiz Sonundaki Görşelleri

Bor karbür zırh üzerinde meydana gelen von Mises gerilmeleri Şekil 21 de verilmiştir. Bor karbür zırhta oluşan en yüksek gerilme değeri 38,25GPa olduğu görülmektedir. Bu penetratorün zırha ilk çarptığı andaki gerilmedir, ikinci yüksek gerilme değeri ise yaklaşık 23GPa olup kuyruk kanatçıklarının zırha çarptığı anda gerçekleşmiştir.



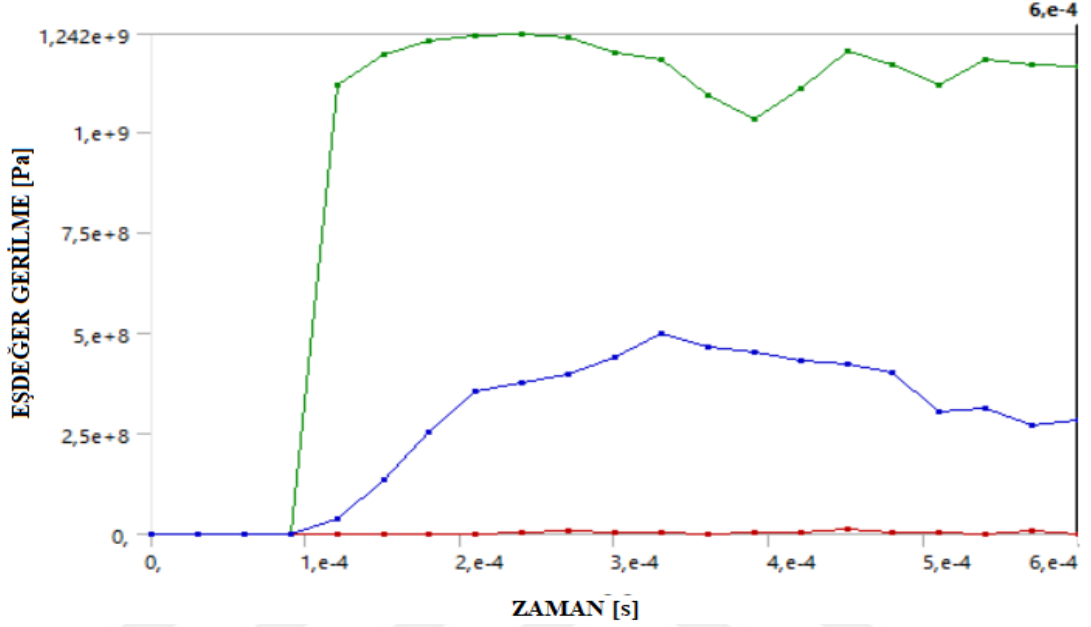
Şekil 21. 15° Çarpışma için Bor Karbür von Mises Gerilme Grafiği

Şekil 22 de ise 4340 çelik plakasının sırasıyla ön, yan ve arka yüzeylerinin gerilme dağılımlarına ait görseller verilmiştir. Gerilmelerin plakanın özellikle köşe noktalarında düşük seviyelerde olduğu görülmüştür. Zırhta meydana gelen deliğin çapı yaklaşık olarak 47,8mm olarak ölçülmüştür. Özellikle zırhın arka yüzeyinde, deliğin etrafında ve plakanın yan yüzeylerinde gerilmelerin yoğunlaştığı görülmüştür.



Şekil 22. 15° Çarpışma İçin 4340 Çelik Zırh Analiz Sonundaki Görselleri

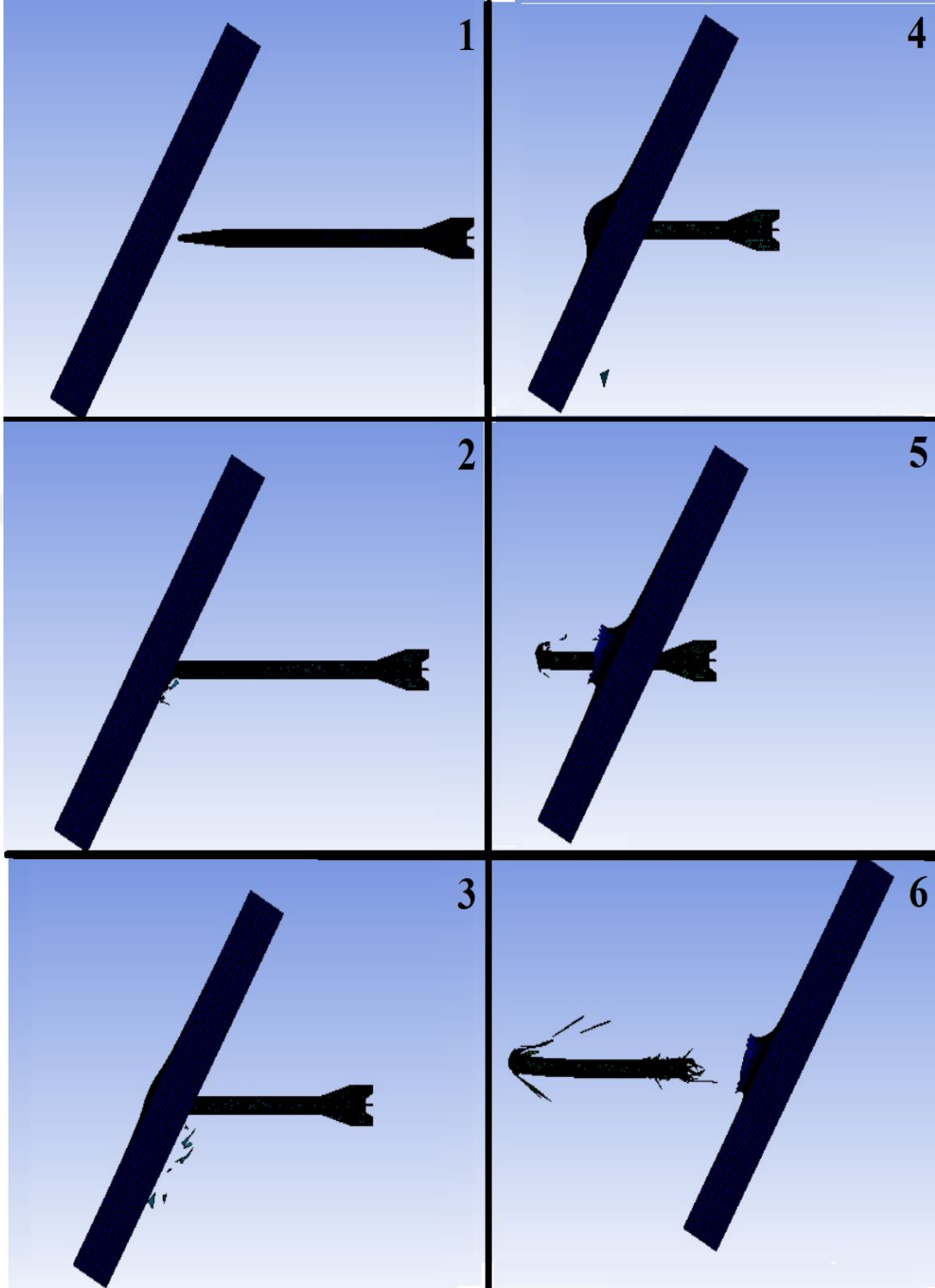
Son zırh plakası olan 4340 çelik zırh plakasında analiz sonucunda okunan en yüksek von Mises gerilme değeri 1,24GPa olup penetratorun plakaya çarptığı anda meydana gelmiştir. Analiz süresince meydana gelen eşdeğer von Mises gerilmeleri Şekil 23 de verilmiştir.



Şekil 23. 15° Çarpışma İçin 4340 Çelik Zırhtaki Gerilmelerin Grafiği

### 3.3 Zırh Açısının 30° Olduğu Durumda Çarpışmanın Numerik Analizi

0 derece çarpışma ve 15 derece çarpışma sonuçlarında elde edilen gerilme ve hız farkları göz önüne alındığında eğim açısı daha fazla arttırıldığında sonuçları gözlemleyebilmek için penetrator ve zırh arasındaki açı 30 dereceye çıkarılarak sonlu elemanlar analizleri yapılmıştır. Analizde, önceki analizlerde olduğu gibi penetrator başlangıç hızı 1750m/s olarak kabul edilmiştir. Analiz süresi 0,006 saniye olarak alınmıştır. Analiz sonuçları Şekil 24 de verilmiştir. Penetratorün deformasyonun önceki analizlere göre arttığı görülmüş buna bağlı olarak zırh plakalarında oluşan deliğin çapının da büyüdüğü görülmüştür.



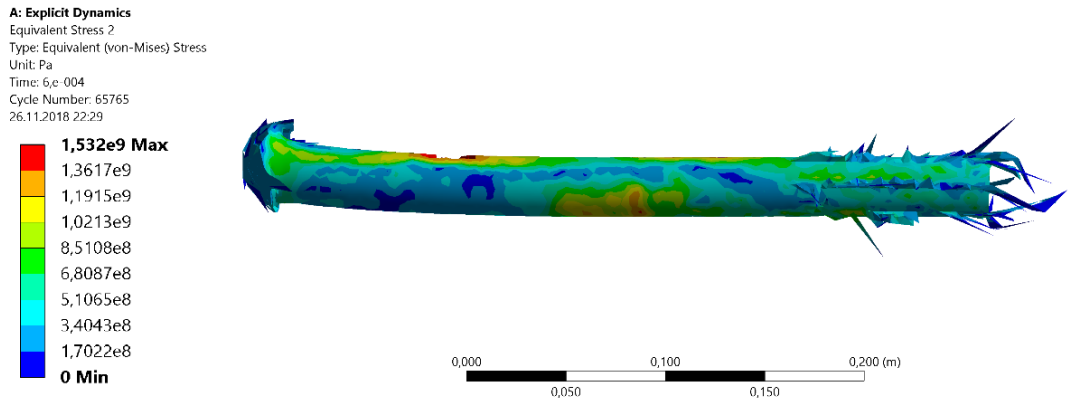
Şekil 24. 30° Çarpışma İçin Analizin Görsel Sonuçları

30 derece çarpışma analizi boyunca penetratorün sahip olduğu hızlar Tablo 6 da verilmiştir. Analiz sonunda penetratorün ortalama hızı 1390,1m/s dir. Bu sonuca göre penetrator çarpışmadan sonra hızında yaklaşık olarak %20,56 azalma görülmüştür.

Tablo 6. 30° Çarpışma Analizi Süresince Penetrator Hızları

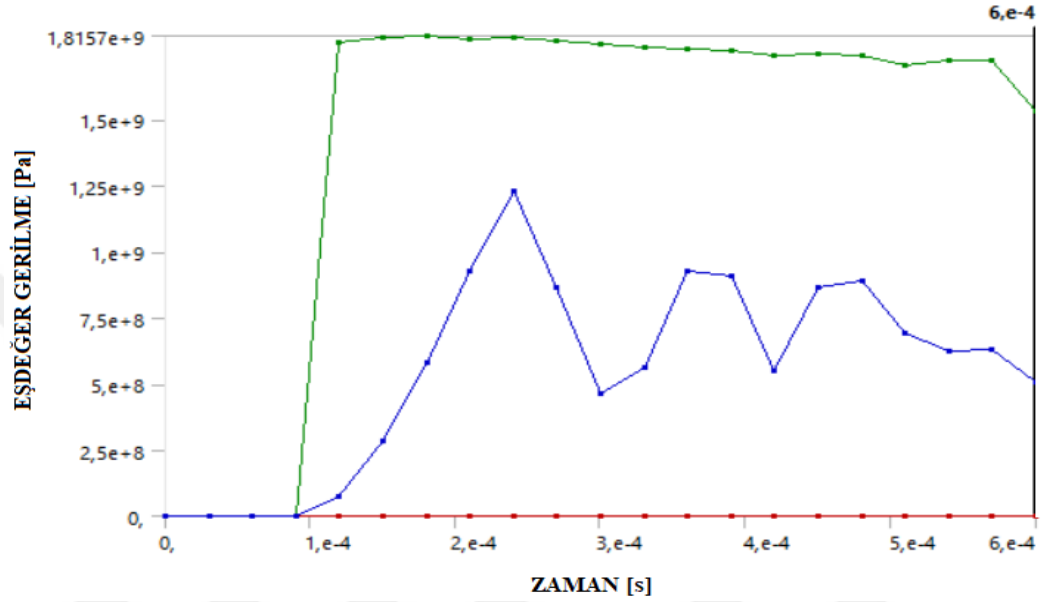
Zaman [m/s]	Minumum [m/s]	Maksimum [m/s]	Ortalama [m/s]
1,1755e-038	1750	1750	1750
3,0033e-005	1750	1750	1750
6,0036e-005	1750	1750	1750
9,0039e-005	1750	1750	1750
1,2001e-004	364,86	3861,9	1745,8
1,5002e-004	102,59	3861,9	1719,9
1,8003e-004	57,823	3861,9	1666,7
2,1001e-004	34,752	3861,9	1609,4
2,4001e-004	18,725	3861,9	1553,2
2,7e-004	18,725	3861,9	1501,1
3e-004	15,317	3861,9	1471,2
3,3e-004	5,633	3861,9	1462,4
3,6e-004	5,4926	3861,9	1460,1
3,9e-004	5,4926	3861,9	1457,6
4,2001e-004	2,9086	3861,9	1455,1
4,5e-004	5,4926	3861,9	1434,9
4,8e-004	5,4926	3861,9	1406,6
5,1001e-004	13,993	3861,9	1396,4
5,4e-004	5,6331	3861,9	1393
5,7e-004	5,6331	3861,9	1391,2
6e-004	5,6331	3861,9	1390,1

30° açı çarpma durumunda penetratorun analiz sonundaki görseli Şekil 25 de verilmiştir. Penetratorde meydana gelen von Mises gerilmeleri Şekil 26 da verilmiştir. Meydana gelen en yüksek gerilme 1,82GPa dır. Bu analizde de deformasyonlar çoğunlukla penetratorün kuyruk ve uç kısmında yoğunlaşmıştır.



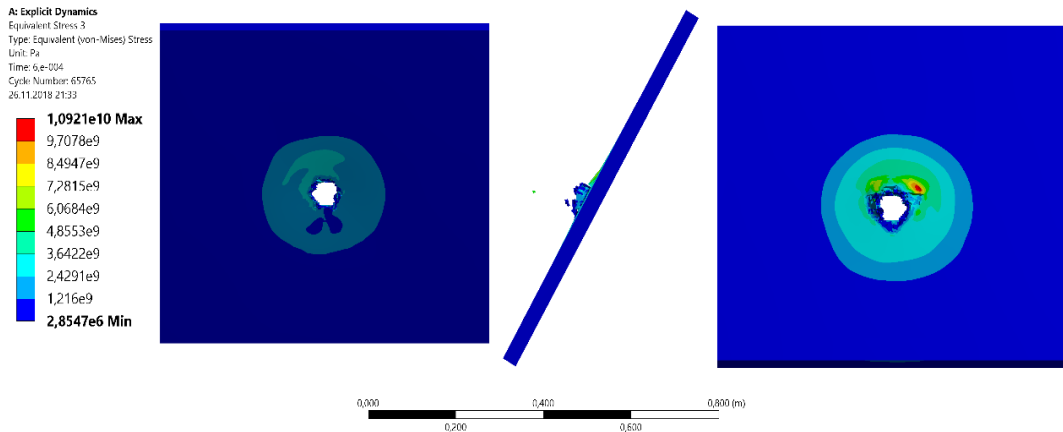
Şekil 25. 30° Çarpışma İçin Penetratorün Analiz Sonundaki Görseli

En yüksek gerilme değeri 0 derece analizinde olduğu gibi penetratorün uç kısmının zırha çarptığı anlarda meydana geldiği görülmüştür. Önceki analizlerden farklı olarak kuyruktaki kanatçık kısmının zırha çarptığı anda gerilme yükselme noktası oluşturmamıştır. Bu durumun çarpmanın ilk anında kuyruk kanatçıklarının kırılmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 26. 30° Çarpışma İçin Penetrator von Mises Gerilme Grafiği

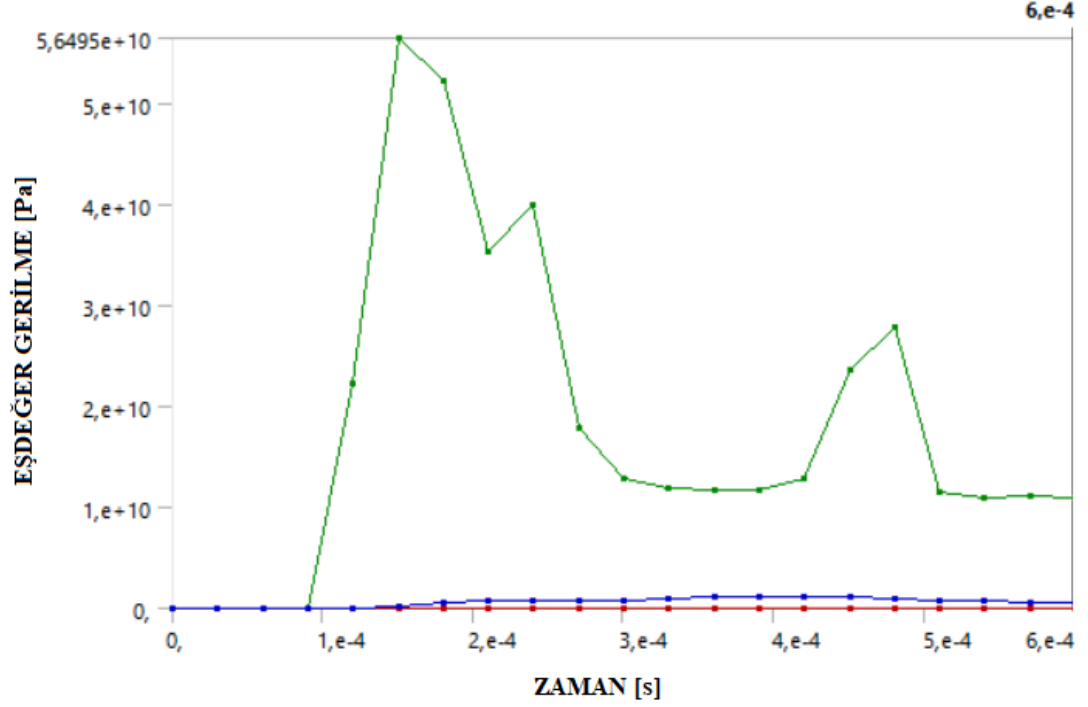
Bor karbür zırhta analiz süresince oluşan von Mises gerilmeleri Şekil 28 de verilmiştir. En yüksek gerilme değeri 56,49GPa dır. Bu değer 0 derecelik çarpışmadan yaklaşık % 75, 15 derecelik çarpışmadan % 48 daha yüksektir. Analiz sonunda bor karbür zırhın son hali Şekil 27 de verilmiştir. Bor karbür zırhta oluşan deliğin genişliği yaklaşık 64,33mm, deliğin etrafında meydana gerilme dairesinin genişliği yaklaşık 324mm dir.



Şekil 27. 30° Çarpışma İçin Bor Karbür Analiz Sonundaki Görselleri

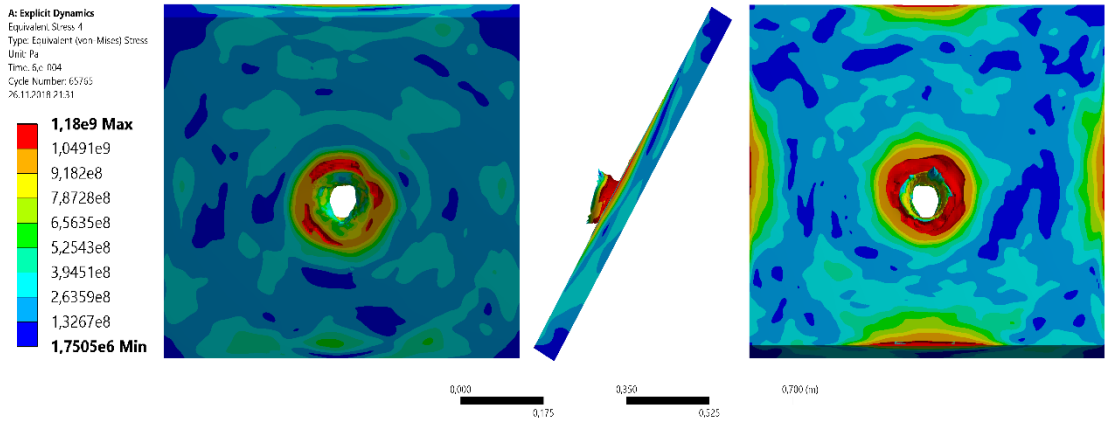


Penetratorün uç kısmının zırha çarptığı anda gerilme en yüksek değerine ulaşmıştır. Kuyruk kısmının zırh plakasına çarptığı, analizin yaklaşık 0,0045s anında gerilmenin yükseldiği görülmüştür.



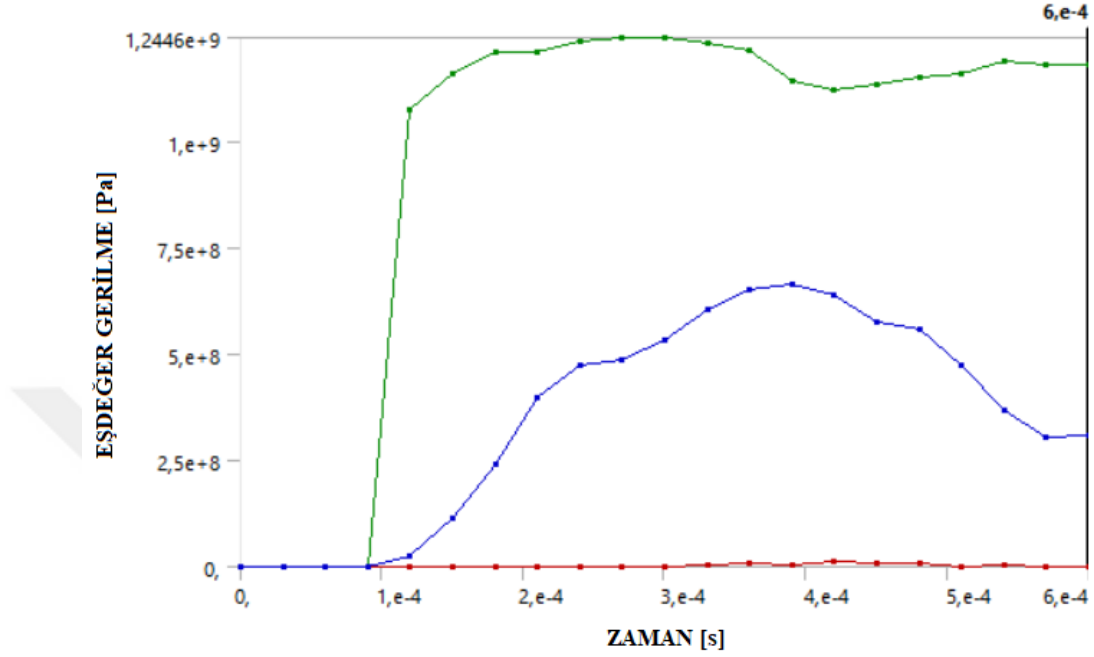
Şekil 28. 30° Çarpışma İçin Bor Karbür von Mises Gerilme Grafiği

Analiz sonunda 4340 çelik üzerinde oluşan gerilme dağılımı Şekil 29 de verilmiştir. En yüksek gerilme değerlerinin, deformasyon sonucu meydana gelen delik çevresinde ve plakanın arka yan bölgelerinde olduğu görülmüştür. Penetrasyon sonucu oluşan deliğin genişliği yaklaşık olarak 64mm olarak ölçülmüştür.



Şekil 29. 30° Çarpışma İçin 4340 Çelik Analiz Sonundaki Görselleri

Şekil 30 da 4340 çelik zırhta meydana gelen gerilmeler verilmiştir. Analiz süresince zırh plakasında meydana gelen en yüksek eşdeğer von Mises gerilme değerinin 1,24GPa olduğu görülmüştür.

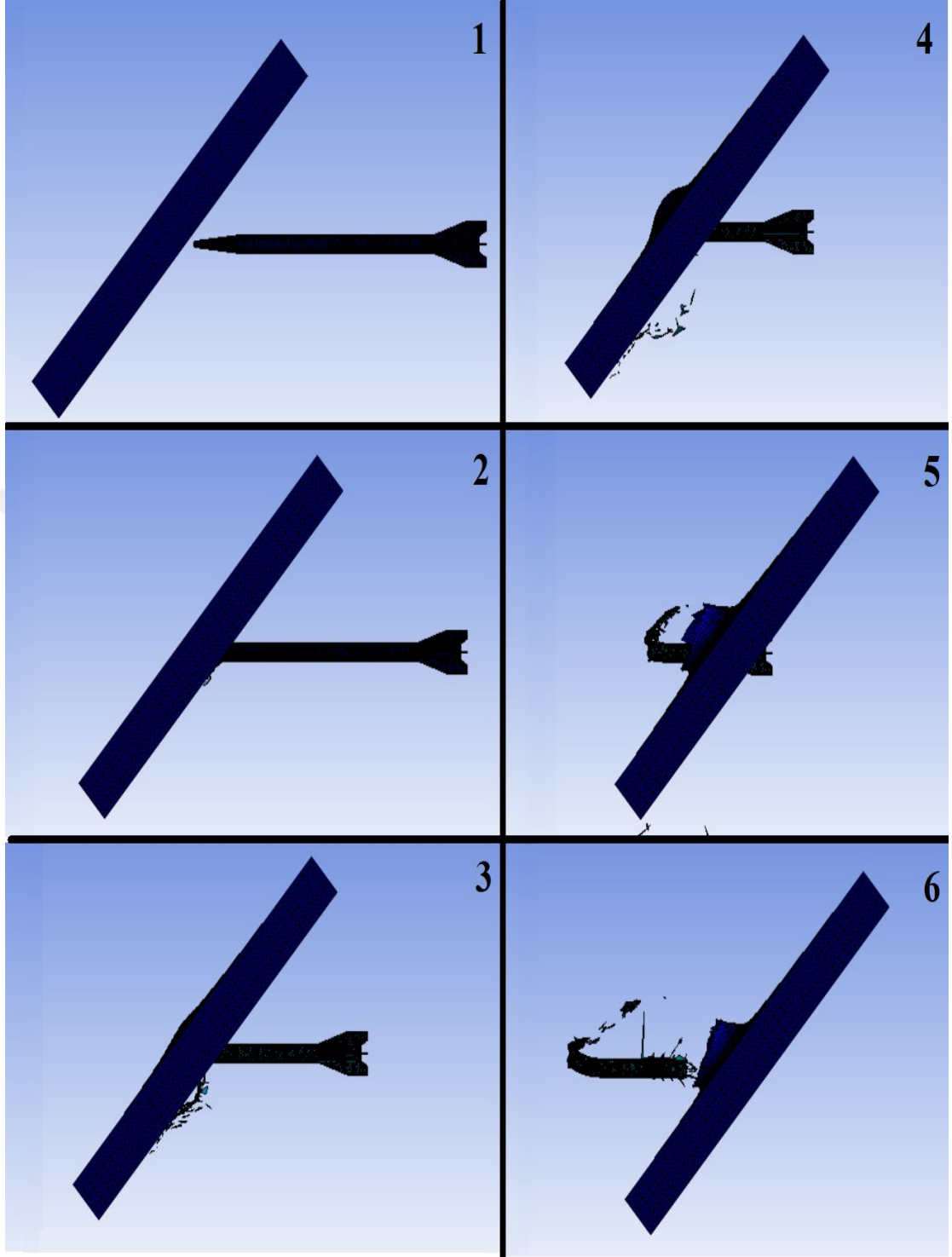


Şekil 30. 30° Çarpışma İçin 4340 Çelik von Mises Gerilme Grafiği

### 3.4 Zırh Açısının 45° Olduğu Durumda Çarpışmanın Numerik Analizi

Daha önceki analizlerde 0, 15 ve 30 derece çarpışmaların analizi yapılmıştır. Bu analizde yatay açı nedeniyle penetratorün zırh içine penetrasyon uzunluğunun arttığı ve bileşke kuvvetinin en aza indiği 45 derecede çarpışma durumu incelenmiştir. Önceki analizlere paralel olarak penetrator başlangıç hızı 1750m/s olarak kabul edilmiştir. Analiz süresi 0,006 saniye olarak alınmıştır.

Şekil 31 de verilen 45 derece çarpışmada yine 0, 15 ve 30 derece çarpışmalarda olduğu gibi penetratorün zırhı deldiği görülmüştür. Penetratorun analiz sonunda deformasyonunun diğer analizlere göre büyük oranla arttığı görülmüştür. Zırhta oluşan deliğin çapının da büyük oranda artmıştır.



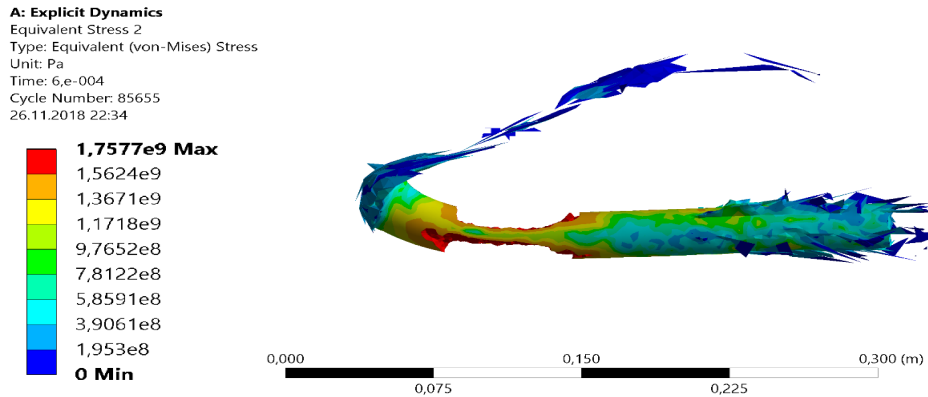
Şekil 31. 45° Çarpışma İçin Analizin Görsel Sonuçları

Penetratorun analiz süresince sahip olduğu hızlar Tablo 7 de verilmiştir. Analiz sonunda penetratorun ortalama hızı 1269,5m/s dir. Bu sonuca göre penetratör analiz süresince hızının yaklaşık % 27,45 ini kaybettiği sonucuna ulaşılabilir.

Tablo 7. 45° Çarpışma Analizi Süresince Penetrator Hızları

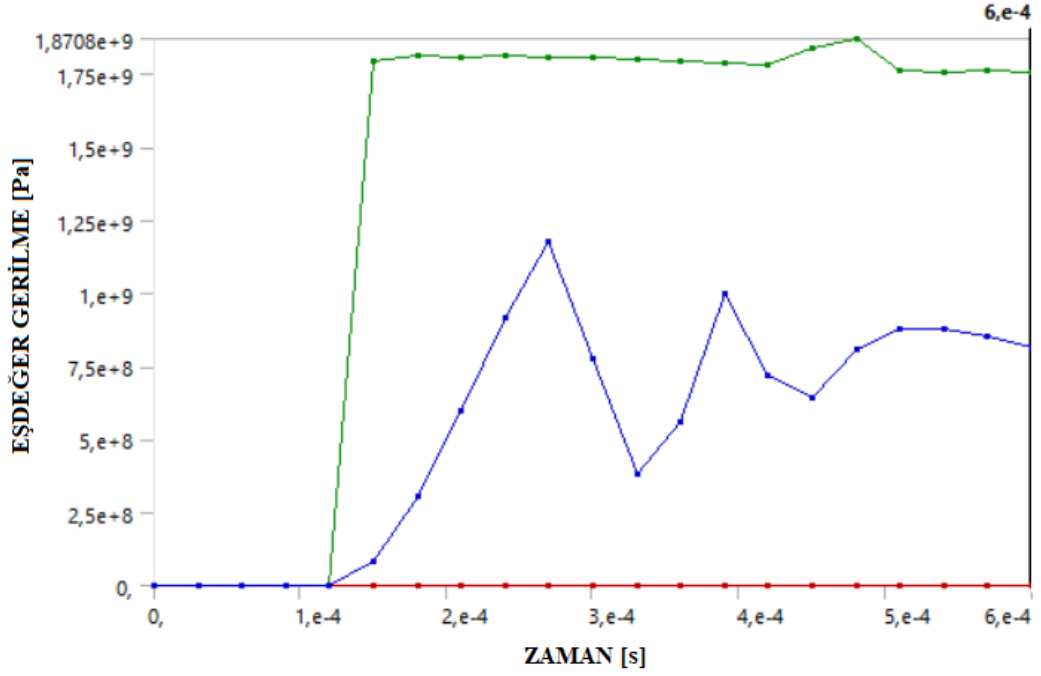
Zaman [m/s]	Minumum [m/s]	Maksimum [m/s]	Ortalama [m/s]
1,1755e-038	1750	1750	1750
3,0033e-005	1750	1750	1750
6,0036e-005	1750	1750	1750
9,0039e-005	1750	1750	1750
1,2004e-004	1750	1750	1750
1,5005e-004	192,72	2992,7	1746,6
1,8001e-004	102,7	2992,7	1729,3
2,1001e-004	97,265	2992,7	1696,7
2,4e-004	41,828	2992,7	1651,6
2,7001e-004	41,828	2992,7	1599,3
3e-004	14,229	2992,7	1533,2
3,3e-004	14,229	2992,7	1466,9
3,6e-004	12,809	2992,7	1410,2
3,9e-004	13,238	2992,7	1370,3
4,2e-004	13,238	2992,7	1351,8
4,5e-004	12,859	2992,7	1345
4,8e-004	7,8682	2992,7	1331,3
5,1e-004	9,822	2992,7	1310,8
5,4e-004	9,822	2992,7	1290,7
5,7e-004	9,822	2992,7	1275,6
6e-004	9,822	2992,7	1269,5

Şekil 32 de analiz sonundaki penetrator görseli verilmiştir. Diğer analizlerden farklı olarak penetratordeki deformasyonların uç ve kuyruk kısmı dışında orta noktalarında da büyük oranda arttığı görülmüştür. Analiz sonundaki değerlerde penetratorun orta bölgesinde ki gerilmenin yaklaşık 1,76GPa olduğu görülmüştür.



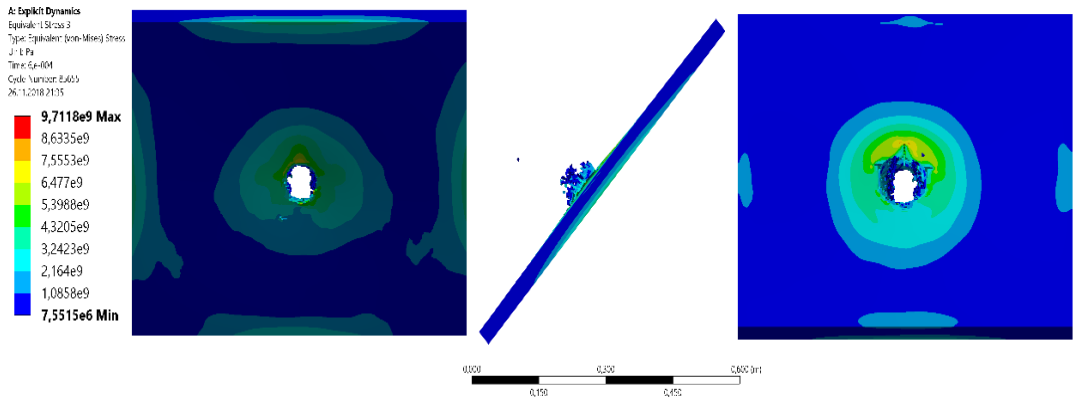
Şekil 32. 45° Çarpışma İçin Penetratorün Analiz Sonundaki Görseli

Şekil 33 de penetratorde meydana gelen von Mises gerilmeleri verilmiştir. Analiz sonuçlarına göre penetratör de meydana gelen en yüksek gerilme değeri 1,87GPa olup penetratorun ilk çarpma anında değil, kuruğun zırha çarptığı anda oluştuğu görülmüştür. Eğim açısının 45 derece olması penetratorde meydana gelen deformasyonları büyük oranda arttırmıştır.



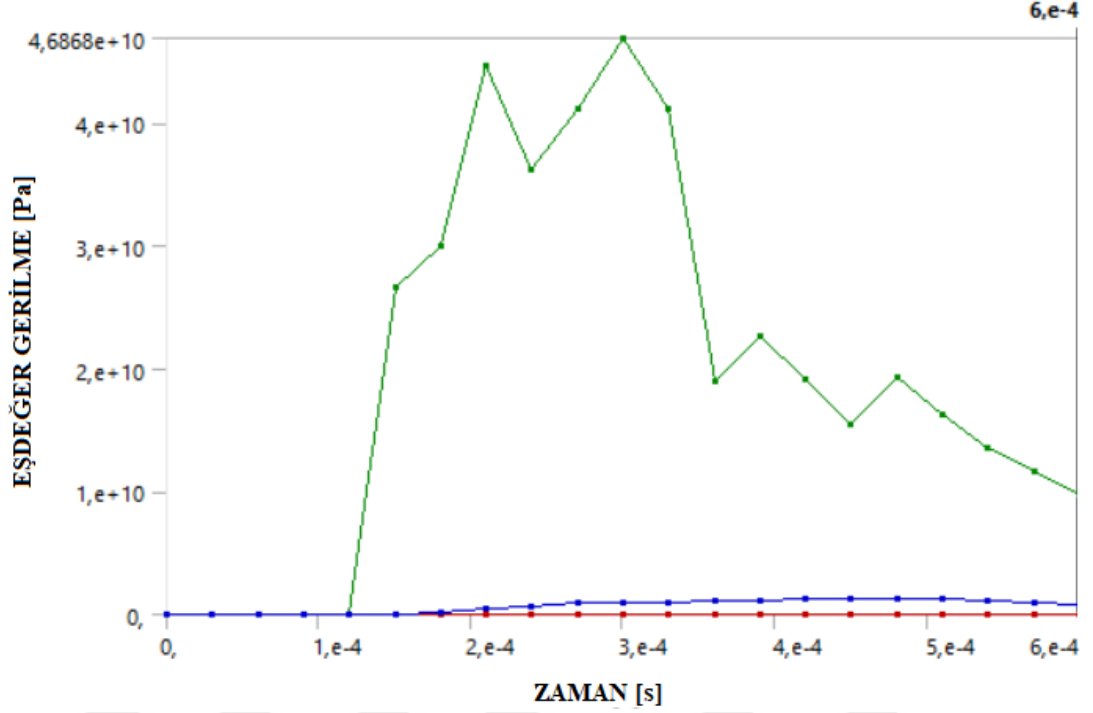
Şekil 33. 45° Çarpışma İçin Penetrator von Mises Gerilme Grafiği

Bor karbürün analiz sonundaki görseli Şekil 34 de verilmiştir. Analiz sonucunda zırh plakasında oluşan deliğin etrafındaki gerilme dairesinin ve delik çapının büyüdüğü görülmüştür. Bor karbür zırhta oluşan deliğin genişliği yaklaşık olarak 83,6mm dir.



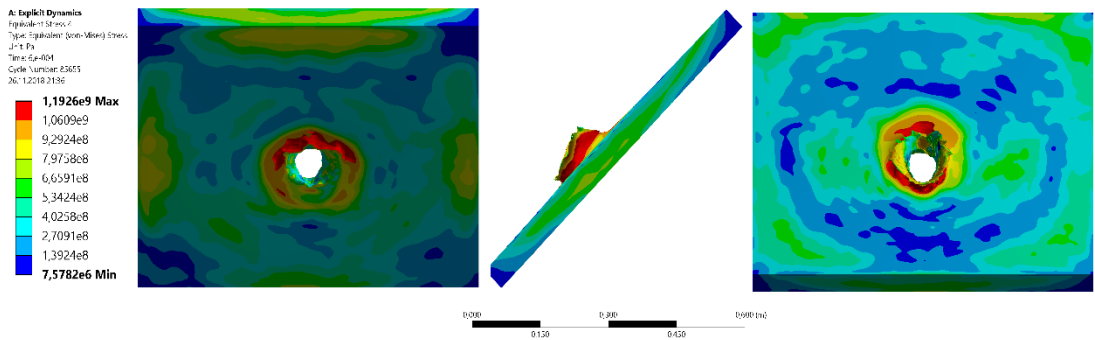
Şekil 34. 45° Çarpışma İçin Bor Karbür Analiz Sonundaki Görselleri

Şekil 35 de analiz sonucunda bor karbür zırh plakasında meydana gelen von Mises gerilmelerinin grafiği verilmiştir. Analiz sonuçlarına göre en yüksek gerilme değeri analizin 0,003s anında olup yaklaşık 46,87GPa dır.



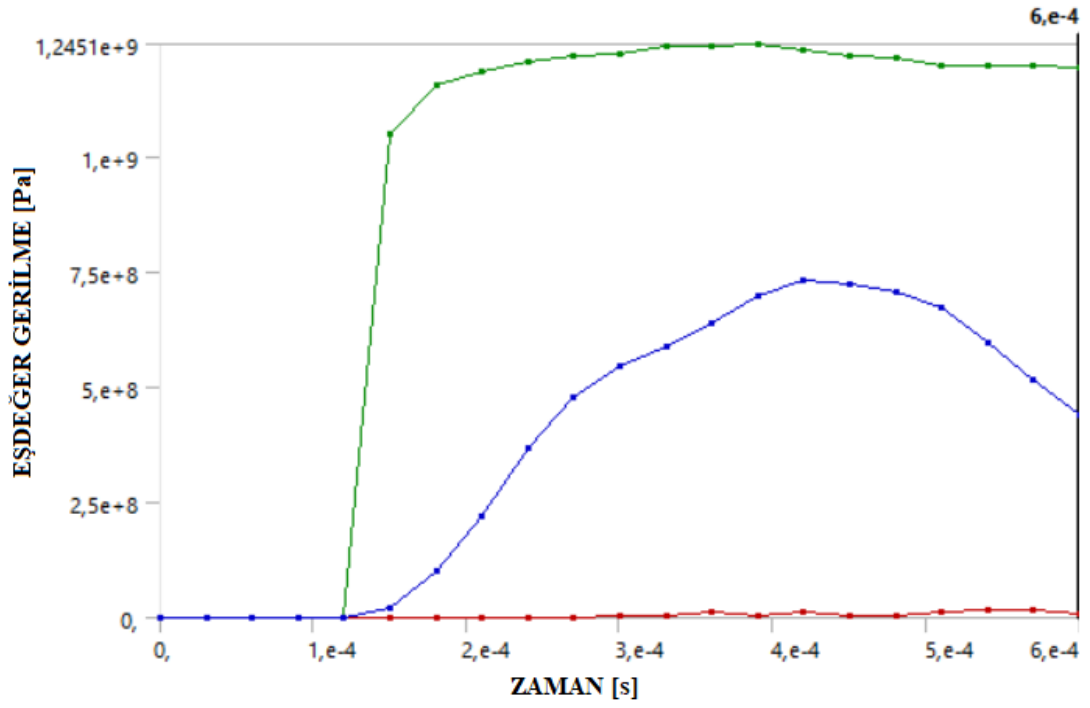
Şekil 35. 45° Çarpışma İçin Bor Karbür von Mises Gerilme Grafiği

Analiz sonunda zırhta meydana gelen deformasyon Şekil 36 da verilmiştir. Gerilmelerin deliğin etrafında yoğunlaştığı görülmüştür. Penetrasyondan sonra meydana gelen deliğin genişliği ortalama 98mm'dir. Plakanın hemen hemen her bölgesinde gerilme görülmektedir. Zırh plakasında meydana gelen gerilmelerin yine önceki analizlerde olduğu gibi delik çevresinde toplandığı görülmektedir.



Şekil 36. 45° Çarpışma İçin 4340 Çelik Analiz Sonundaki Görselleri

Şekil 37 de 4340 çelik zırh plakasında analiz boyunca meydana gelen von Mises gerilmeleri verilmiştir. Zırhta meydana gelen en büyük gerilme 1,245GPa dır.



Şekil 37. 45° Çarpışma İçin 4340 Çelik von Mises Gerilme Grafiği

## BÖLÜM 4. SONUÇLAR

Hafifliği, yüksek ısı direnci sayesinde zırh teknolojisinde kullanılan seramik tabanlı bor karbür zırh plakası, 4340 çelik plakasıyla desteklenmiş durumda tasarımı yapılmıştır. Kinetik enerjili mühimmat penetratorünün tasarımı yapılmış ve malzemesi için seyreltilmiş uranyuma alternatif olan tungsten alaşım kullanılmıştır. Mühimmat ve zırh plakalarının numerik analiz incelenmesi yapılmış, analiz sonucunda gerilme, deformasyon, eğik çarpışma ve penetrator hızları incelenmiştir.

1- Yapılan numerik analizlerin sonucunda 4340 çelik plaka ile desteklenmiş bor karbür zırhın tungsten alaşımdan yapılmış kinetik enerjili mühimmat penetratorüne karşı mühimmatın etki alanı içinde direnç sağlayamadığı sonucuna ulaşılmıştır.

2- Penetratorün eğimli yüzeylerin üzerine etki ettiğinde sonucunun ne olacağı sorusuna cevap aranmış 15, 30, 45 ve 0 derece çarpışmaları için numerik analiz yapılmış analizler sonucunda çarpma açısının zırhı delmesinde önemli bir faktör olduğu fakat yine de 45 derecelik çarpma analizinde bile zırhın delindiği görülmüştür.

3- 0 derecelik dik çarpışmada penetratorde oluşan deformasyonlar çoğunlukla penetratorün uç ve kuyruk kısmında gerçekleşirken, çarpma açısının artmasıyla penetratorde oluşan deformasyonların özellikle orta bölgesinde arttığı ve 45 derecelik çarpma açısında penetratorde oluşan deformasyonların penetratorün her bölgesinde olduğu görülmüştür.

4-Analizler sonunda penetrator hızları incelenmiş 0 derece atışta hızının %13,5, 15 derece atışta %16,4, 30 derece atışta %20,56 ve 45 derece atışta %27,45 oranında azaldığı görülmüştür.



## BÖLÜM 5. ÖNERİLER

Johnson-Cook ve Johnson-Holmquist malzeme modelleri kullanılarak numerik analiz yapılan bu çalışmanın sonucunda aşağıdaki önerilerde bulunulabilir;

1.Penetrator geometrisi değiştirilip, farklı çap ve boy oranlarında zırh plakaları üzerine deformasyon etkileri incelenebilir.

2.Daha yüksek itici kuvvet elde edilmesi durumunda, penetrator için daha yüksek kinetik enerji sağlanacağından penetrasyon ve zırh için oluşacak deformasyonlar incelenebilir.

3.Zırh kalınlığının artırılmasıyla veya değişik zırh geometrileri ile penetrasyon etkileri incelenebilir..

4.Farklı sürtünme katsayıları ve yüzey işleme yöntemlerinin etkileri ileri bir çalışma olarak ele alınabilir.

## KAYNAKLAR

- [1] Leonardo Da Vinci's Inventions. Erişim Tarihi: 22.10.2018 15:04  
<http://www.leonardodavincisinventions.com/war-machines/leonardo-da-vincis-tank/>
- [2] Imperial War Museum. Erişim Tarihi : 22.10.2018 14:05  
<https://www.iwm.org.uk/history/how-britain-invented-the-tank-in-the-first-world-war>
- [3] Karagöz, Ş. Atapek, H. 2007. Bor Katkılı Zırh Çeliklerinin Kırılma Davranışı. 8.Uluslar Arası Kırılma Konferansı Bildiriler Kitabı. 7 – 9 Kasım 2007
- [4] Johnson, K. L. 2008. Analysis of Multi-Layered Materials Under High Velocity Impact Using CTH. Department of The Air Force Air University Degree of Master of Science in Aeronautical Engineering
- [5] Kim, D.K., Lee, S., Baek, W. H. 1997. Microstructural Study of Adiabatic Shear Bands Formed by High-Speed Impact in a Tungsten Heavy Alloy Penetrator. Materials Science and Engineering A249 (1998) 197–205
- [6] Lundberg, P., Lundberg, B. 2004. Transition between interface defeat and penetration for tungsten projectiles and four silicon carbide materials. International Journal of Impact Engineering 31 (2005) 781–792
- [7] Westerling, L., Lundberg, P., Lundberg, B., 2000. Tungsten Long-Rod Penetration Into Confined Cylinders of Boron Carbide at and Above Ordnance Velocities. Elsevier International Journal of Impact Engineering 25 (2001) 703-714
- [8] Yumak N., Pekbey Y., Aslantaş K. 2014. Zırh Tasarımında Kullanılan Kompozit Malzemelerin Deformasyon Karakteristiğinin Araştırılması. Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi Cilt: 10, No: 4, 2013 (1-21)
- [9] Grujic, M., Arakere, G., He, T. , Bell, W. C., Chessemann, B. A., Yen, C. F., Scott, B., 2008. A Ballistic Material Model For Cross-Plyed Unidirectional Ultra-High Molecular-Weight Polyethylene Fiber-Reinforced Armor-Grade Composites. Elsevier, Materials Science and Engineering A 498 (2008) 231–241
- [10] Orphal, D. L., Franzen, R. R., Piekutowski, A. J., Forrestal, M. J. 1995. Penetration of Confined Aluminum Nitride Targets by Tungsten Long Rods at 1,5 to 4,5 km/s. Elsevier Int. J Impact Eng. Vol.18 No:4 pp 355,368
- [11] Orphal, D. L., Franzen, R. 1995. Penetration of Confined Silicon Carbide Targets by Tungsten Long Rods at Impact Velocities From 1.5 to 4.6 km/s. Elsevier Int. J Impact Eng. Vol.19 No:1 pp 1, 13

- [12] Crouch, G. I., Appleby-Thomas, G., Hazell, P. J. 2015. A Study of the Penetration Behaviour of Mild-steel-cored Ammunition Against Boron Carbide Ceramic Armors. Elsevier International Journal of Impact Engineering 80 (2015) 203e211
- [13] Arslan, G., Kara, F., Turan, S., Kalemtaş, A., Tunçer, N., Bor Karbür-Alüminyum Kompozitlerin Balistik Performansı. SAVTEK 2006, Savunma Teknolojileri Kongresi 29-30 Haziran 2006, ODTÜ, Ankara
- [14] Holmquist, T. J., Johnson, G.R. 2007. Response of Boron Carbide Subjected to High-Velocity Impact. Elsevier, International Journal of Impact Engineering 35 (2008) 742–752
- [15] Banerjee, A., Dhar, S., Acharyya, S., Datta, D., Nayak, N. 2016. Numerical Simulation of Ballistic Impact of Armour Steel Plate by Typical Armour Piercing Projectile. 1. International Symposium on Plasticity and Impact Mechanics, Implast 2016, Procedia Engineering 173 ( 2017 ) 347 – 354
- [16] Brothers, J. 1966. Tandem effect anti tank projectile. United States Patent Office Filed
- [17] Deshbande, P.U, Prabhu, V.D, Prabhakaran, K.V. 2003. Impulsive Loading of Armour by High Explosive Squah Head Munition
- [18] Plostins, P, Celmins, I, Bornstein, J, Diebler, J.E. 1989. The Effect of Sabot Front Borerider Stiffness On The Launch Dynamics of Fin-Stabilized Kinetic Energy Ammunition. U S Army Ballistic Research Laboratory, BRL-TR-3047
- [19] Whittington, W.R, Oppedal, A.L, Turnage, S, Hammi, Y., Rhee, H., Allison, P.G.,Crane,C.K, Horstemeyer, M.F. 2013. Capturing the effect of temperature, strain rate, and stress state on the plasticity and fracture of rolled homogeneous armor (RHA) steel
- [20] Horsfall, I., Petrou, E., Champion, S.M. 2007. Shaped Charge Attack of Spaced and Composite Armour. 23. International Symposium On Ballistics Tarragona, Spain 16-20 April
- [21] Seo, Y., Kim, J.T., Choi, C. 2009. Explosive Reactive Armor With Momentum Transfer Mechanism. United States Patent, Patent No: US 7,540,229 B2
- [22] Tank Military Vehicle, erişim tarihi : 20.10.2018 10:08  
<https://www.britannica.com/technology/tank-military-vehicle#ref521359>
- [23] Cohen, M. 2006. Composite Armor Plate. United States Patent, Patent No: US 7,117,780 B2
- [24] Bilim ve Teknik Dergisi, Şubat 2013, Altay ana muharebe tankı sayfa 16-19

- [25] Yeşilkaya, B., İbişoğlu, G. 2003. Bor Karbür Ön Fizibilite Raporu. Eti Maden Holding Planlama ve Bilgi İşlem Dairesi Başkanlığı
- [26] Damith, M., Muneeb, A., Tuan, N., Jinghan, L., Priyan, M., Dong, R., 2013, “Out of Plane Impact Resistance of Aluminium Plates Subjected to Low Velocity Impact” materials and design, vol 50, pp 413-426.
- [27] Dorogoy, A., Rittel, D., “Technical note: Determination of the Johnson-Cook material parameters using the SCS specimen” Mechanical Engineering Department, Technion – Israel Institute of Technology.
- [28] Johnson GR, Holmquist TJ. In: Meyers MA, Murr LE, Staudhammer KP, editors. A computational constitutive model for brittle materials subjected to large strains, high strain rates, and high pressures. New York: Marcel Dekker Inc; 1992. p. 1075-81.
- [29] Johnson GR, Holmquist TJ. 1994. An improved computational constitutive model for brittle materials. In: High pressure Science and technology-1993. New York: American Institute of Physics; 1994. p. 981-4.
- [30] Holmquist, T.A., Templeton, W.D., Bishnoi, K.D., 2001, “Constitutive modeling of aluminum nitride for large strain, high-strain rate, and high-pressure applications”, International Journal of Impact Engineering 25, 211-231
- [31] Wang, Y., Yang, Z., 2008, “Finite element model of erosive wear on ductile and brittle materials”, Wear, 265, 871–878.
- [32] Tasdemirci, A., Hall, I.W., 2007, “Numerical and experimental studies of damage generation in multi-layer composite materials at high strain rates”, International Journal of Impact Engineering 34, 189–204.
- [33] Krishnan, K., Sockalingam, S., Bansal, S., Rajan, S.D., 2010, “Numerical simulation of ceramic composite armor subjected to ballistic impact”, Composites: Part B, 41, 583–593.
- [34] Daniel Burger, Alfredo Rocha de Faria, Sergio F.M. de Almeida, Francisco C.L. de Melo, Mauricio V. Donadon 2012, “Ballistic impact simulation of an armour-piercing projectile on hybrid ceramic/fiber reinforced composite armours”, International Journal of Impact Engineering 43, 63-77.
- [35] Lanz, W., Odermatt, W. 1992. Penetration Limits Of Conventional Large Caliber Anti Tank Guns/Kinetic Energy Projectiles Defence Technology and Procurement Agency, Ballistics Division, CH-3602 Thun, Switzerland
- [36] Article kinetic energy munitions, erişim tarihi: 02.10.2018 17:04 <http://tof.canardpc.com/view/78661307-83c8-40ed-bb82-3c7a5b5f8230.jpg>

- [37] Los Alamos Scientific Laboratory LA-4167-MS. May 1 1969. Selected Hugoniot: EOS 7th Int. Symp. Ballistics. Johnson + Cook
- [38] Lundberg P. Westerling L. 1999 "Simulation of Long..." Proc. 1st Euro. Ceramic Modelling Workshop-Sept
- [39] Johnson G. R., Cook W. H., 1985. Fracture Characteristic of Three Metals Subjected to Various Strains, Strain Rates, Temperatures and Pressures. Engng. Frac. Mech. Vol 21. No. 1. pp 31-48. 1985 Johnson Cook
- [40] Hohler V, Stilp AJ, Weber K. Hypervelocity Penetration of Tungsten Sinter-Alloy Rods into Alumina. Int J Impact Engng 1995;17(1-6):409-18.



## ÖZGEÇMİŞ

1990 yılında Erzincan da doğdu. İlkokulu Malatya Rahmi Akıncı İlköğretim okulunda başladığı öğrenimini Bilecik Osmangazi İlköğretim okulunda 2004 yılında tamamladı. Lise öğrenimini Bilecik Anadolu Lisesinde 2008 yılında tamamladı. Bozok Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümünden 2014 yılında mezun oldu. Kendi kurduğu mühendislik firmasında çalışma hayatına devam etmektedir.

