

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MERMİ-ZİRH ETKİLEŞİMİNİN ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Hüseyin Ekrem DEMİRTAŞ

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Malzeme ve İmalat Programı

OCAK 2015

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MERMİ-ZİRH ETKİLEŞİMİNİN ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Hüseyin Ekrem DEMİRTAŞ
(503091345)**

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Malzeme ve İmalat Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Celaletdin ERGUN

OCAK 2015

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 503091345 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Hüseyin Ekrem DEMİRTAŞ**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**MERMİ-ZİRH ETKİLEŞİMİNİN ANALİZİ**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Celaletdin ERGUN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Hüseyin ÇİMENÖĞLU**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Cihan DEMİR
Yıldız Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : **13 Aralık 2014**
Savunma Tarihi : **23 Ocak 2015**

Aileme,

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasında seramik ön levha ve alüminyum destek plakasında oluşan bir zırh sistemi farklı parametler kullanılarak, nümerik simülasyonlar yardımıyla sistemi nasıl etkilediği incelenmiştir. Bu parametlerin belirlenmesinde AUTODYNA sonlu elemanlar programından yararlanılmıştır. Elde edilen sonuçlar değerlendirilip uygulanan şartlar altında optimum seramik levha ve alüminyum malzeme kalınlığı bulunmuştur.

Bu tez çalışmamı yürüten, olumlu eleştirileri ve yönlendirmeleriyle katkıda bulunan, her fırsatta yardımını esirgemeyen değerli hocam Sn. Prof. Dr. Celaletdin ERGUN'a teşekkürlerimi sunarım.

Bana hayatımın her anında desteklerini esirgemeyen, attığım her adımda arkamda durup gerektiği yerlerde yönlendirmeleriyle hayatıma olumlu katkı sağlayan sevgili AİLEME şükranlarımı sunarım.

Tez çalışmamda beni her zaman dinleyen, destek olan ve gerekli noktalarda bana tavsiyelerde bulunun sevgili dostum Faruk SOYDAN'a da teşekkürlerimi sunarım.

Ocak 2015

Hüseyin Ekrem DEMİRTAŞ
(Makina Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
SEMBOL LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xvii
ÖZET.....	xix
SUMMARY	xxi
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı.....	2
2. ZİRH YAPIMINDA KULLANILAN MALZEME VE MÜHİMMATLAR.....	3
2.1 Zırh Yapımında Kullanılan Seramik Malzemeler.....	3
2.1.1 Seramiklerin genel özellikleri	3
2.1.1.1 Alumina (Al_2O_3) seramik levhaları.....	4
2.1.1.2 Bor Karbür (B_4C) seramik levhaları	6
2.1.2 Seramik levhaların çalışma prensipleri	7
2.1.3 Seramik levhaların kırılma prensipleri	7
2.1.3.1 Merminin hasara uğrama aşaması.....	8
2.1.3.2 Mermi enerjisinin absorbe edilme aşaması	9
2.1.3.2.1 Merminin erozyana uğraması	9
2.1.3.2.2 Destek plakasında meydana gelen plastik deformasyon	10
2.2 Destek Plakası Olarak Kullanılan Sünek Malzemeler.....	10
2.3 Mühimmatlar	12
2.3.1 Tabanca ve yivli tüfek mermileri	12
2.3.2 Ağır tüfek mermileri	13
3. LİTERATÜR ÇALIŞMASI.....	15
3.1 Deneysel Çalışmalar	15
3.2 Nümerik Çalışmalar.....	19
3.3 Analitik Çalışmalar.....	22
3.3.1 Florence modeli ve analitik tasarım kriteri	22
3.3.1.1 Florence modeli	22
3.3.1.2 Analitik tasarım kriteri.....	22
4. ZİRH TASARIMINA ETKİ EDEN FAKTÖRLER.....	25
4.1 Mermi Geometrisinin Etkisi	25
4.2 Kalınlık.....	25
4.3 Eğiklik	25
4.4 Yapıştırıcı	25
4.5 Malzeme Saflığı ve Tane Boyutu.....	27
4.6 Tokluk ve Sertlik.....	27
5. DARBE OLAYLARININ NÜMERİK SİMÜLASYONU	29
5.1 Genel bilgiler	29

5.2 Sonlu elemanlar yöntemi	30
5.2.1 Darbe dinamiği ve explicit method	30
5.2.2 Nümerik analiz.....	33
5.2.2.1 Kütleinin korunumu	34
5.2.2.2 Momentumun korunumu	34
5.2.2.3 Enerjinin korunumu.....	36
5.2.3 Malzeme modelleme	36
5.2.3.1 Linear bünye denklemleri	36
5.2.3.2 Nonlinear bünye denklemleri.....	37
5.2.3.3 Şok bünye denklemleri	37
5.2.4 Dayanım	38
5.2.5 Hasar	40
5.2.6 Malzemelerde modellerinin nümerik incelenmesi.....	40
5.2.6.1 Seramik zırhlar için Johnson-Holmquist (JH) dayanım modeli	40
5.2.6.2 Seramik zırhlar için Johnson-Holmquist (JH) kırılma modeli	42
5.2.6.3 Mermi için kullanılan Johnson-Cook dayanım modeli	43
5.2.6.4 Mermi için kullanılan Johnson-Cook kırılma modeli	44
5.2.7 Kompozit zırhın nümerik analiz sonuçları	44
5.2.7.1 Zırh sistemine ön gerilme kuvveti uygulanması	49
5.2.7.2 Arka destek plakası olarak farklı ısıtılmış malzemelerin kullanılması.....	53
5.2.7.3 Yapıştırıcı kalınlığının artırılmasının sistem üzerindeki etkisinin incelenmesi	58
5.2.7.4 Destek plakanın katmanlı bir yapı oluşturulmasında sistem üzerine etkisinin incelenmesi	63
5.2.7.5 Optimum zırh kalınlığının belirlenmesi	69
5.2.8 Sonuçlar.....	85
5.2.9 Öneriler	86
KAYNAKLAR.....	87
ÖZGEÇMİŞ.....	91

KISALTMALAR

Al₂O₃	: Alüminyum Oksit
B₄C	: Bor Karbür
APDS	: Armor-Piercing Discarding Sabot (Sabot Atarak Zırh Delici)
APP	: Armor Piercing Projectile (Zırh Delici Mermi)
DOP	: Depth of Penetration (Derinlik Ölçme Yöntemi)
RHA	: Rolled Homogeneous Armor (Haddelenmiş Homojen Zırh)
DEF	: Diferansiyel Etkinlik Faktörü
SPH	: Smooth Particle Hydrodynamics

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Çeşitli yoğunluklardaki Al ₂ O ₃ malzemelerin mekanik ve fiziksel özellikleri.....	5
Çizelge 2.2 : Bor karbür'ün mekanik ve fiziksel özellikleri.	6
Çizelge 5.1 : Çelik mermi için malzeme model parametreleri	46
Çizelge 5.2 : Alüminyum oksit ön levha için malzeme model parametreleri.....	47
Çizelge 5.3 : Alüminyum 2024 –T4 arka levha için malzeme model parametreleri .	48
Çizelge 5.4 : Alüminyum arka levha için malzeme model parametreleri	49

SEMBOL LİSTESİ

V_p	: Tahmini Balistik Hız Limiti
ε	: Kopma Uzaması
σ	: Maksimum Çekme Dayanımı
ρ	: Yoğunluk
h	: Kalınlık
m	: Kütle
a_p	: Mermi Yarıçapı
α	: Denklemler ile Belirlenen Katsayı
T	: Toplam Zırh Kalınlığı
A	: Deneysel Verilerle Elde Edilmiş Katsayı
t	: Zaman
n	: Zaman Artışı
d^n	: Yer Değiştirme
a^n	: İvme
c	: Sönümleme Katsayısı
k	: Rijitlik Katsayısı
ω_n	: Doğal Frekans
ζ	: Sönümleme Faktörü
F	: Kuvvet
b	: Kısmi Hacimlerdeki Body Kuvveti
$I(t)$	: Lineer Hareket
$D(t)$	: Açısal Momentum
μ	: Young Modülü
E	: Elastiklik Modülü
K	: Hacim Modülü
P	: Basınç
ϵ	: İç Enerji
c	: Ses Hızı
V_s	: Şok Yayılma Hızı
C	: Boyutsuz Şekil Değişim Sabiti
D	: Hasar
ε_p	: Plastik Şekil Değişimi
G	: Kayma Modülü
B	: Şekil Değişim Sertleşme Etkisi

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1: Seramik zırh sistemleri için çeşitli örnekler	5
Şekil 2.2: Seramik/kompozit yapının çalışma prensibi	8
Şekil 2.3: Seramik malzeme içerisine doğru ilk penetrasyon	9
Şekil 2.4: Sünek malzemede meydana gelen konik şekil	10
Şekil 2.5: a) 7.62 mm çapında tungsten karbür çekirdekten oluşan zırh delici mermi b) Farklı tabanca kartuşları	13
Şekil 2.6: a) NATO ülkelerinde kullanılan mermi b) Doğu ülkelerinde kullanılan mermi	14
Şekil 3.1: Florence model	23
Şekil 4.1: Kullanılan mermi geometrileri	25
Şekil 4.2: a) Düz uçlu mermi, b) Yarı küresel mermi, c) Konik mermi, d) Sivri uçlu mermi	26
Şekil 5.1: Darbe simülasyonları için hesaplama prosesleri	29
Şekil 5.2: Sönümlleme ile tek serbestlik dereceli model	32
Şekil 5.3: Şok dalgalarının önünde ve arkasındaki değişkenlerinin belirlenmesi için değişkenlerin durumu	38
Şekil 5.4: Faz değişimi meydana gelmeden JHB seramik model	39
Şekil 5.5: JH-1 dayanım modeli	41
Şekil 5.6: JH-1 hasar modeli	41
Şekil 5.7: Basınç-Hacimsel Değişim	42
Şekil 5.8: Autodyn programında tasarlanan zırh modeli	45
Şekil 5.9: 3 eksenli hareketi engellenmiş sistemden merminin çıkışının ön görüntüsü	49
Şekil 5.10: 3 eksenli hareketi engellenmiş sistemden merminin çıkışının arka görüntüsü	50
Şekil 5.11: Sadece merminin geliş yönünde hareketi engellenmiş merminin çıkışının ön görüntüsü	50
Şekil 5.12: Sadece merminin geliş yönünde hareketi engellenmiş merminin çıkışının arka görüntüsü	51
Şekil 5.13: Mermi hızının zamana bağlı olarak değişimi	52
Şekil 5.14: Alüminyum malzemenin atış sonrası ön görüntüsü	53
Şekil 5.15: Alüminyum malzemenin atış sonrası arka görüntüsü	53
Şekil 5.16: Al2020-T3 malzemenin atış sonrası ön görüntüsü	54
Şekil 5.17: Al2020-T3 malzemenin atış sonrası arka görüntüsü	54
Şekil 5.18: Al2020-T4 malzemenin atış sonrası arka görüntüsü	55
Şekil 5.19: Al2020-T4 malzemenin atış sonrası arka görüntüsü	55
Şekil 5.20: Isıl işlem durumu farklı malzeme kullanılan sistemden mermi çıkış hızının zamana bağlı değişimi	57
Şekil 5.21: Yapıştırıcı kalınlığı 1 mm olan sistemin sonrası ön görüntüsü	58
Şekil 5.22: Yapıştırıcı kalınlığı 1 mm olan sistemin sonrası arka görüntüsü	59
Şekil 5.23: Yapıştırıcı kalınlığı 2 mm olan sistemin sonrası ön görüntüsü	59

Şekil 5.24: Yapıştırıcı kalınlığı 2 mm olan sistemin sonrası arka görüntüsü	60
Şekil 5.25: Yapıştırıcı kullanılmayan sistemin sonrası ön görüntüsü	60
Şekil 5.26: Yapıştırıcı kullanılmayan sistemin sonrası arka görüntüsü	61
Şekil 5.27: Yapıştırıcı kalınlığına bağlı olarak merminin sistemden çıkış hız	62
Şekil 5.28: Tek katmanlı Al2024-T4 zırh sisteminde mermi çıkış sonrası ön görüntüsü	63
Şekil 5.29: Tek katmanlı Al2024-T4 zırh sisteminde mermi çıkış sonrası arka görüntüsü	64
Şekil 5.30: İki katmanlı Al2024-T4 zırh sisteminde mermi çıkış sonrası ön görüntüsü	64
Şekil 5.31: İki katmanlı Al2024-T4 zırh sisteminde mermi çıkış sonrası arka görüntüsü	65
Şekil 5.32: Üç katmanlı Al2024-T4 zırh sisteminde mermi çıkış sonrası ön görüntüsü	65
Şekil 5.33: Üç katmanlı Al2024-T4 zırh sisteminde mermi çıkış sonrası arka görüntüsü	66
Şekil 5.34: İki katmanlı Al ₂ O ₃ zırh sisteminde mermi çıkış sonrası ön görüntüsü	66
Şekil 5.35: İki katmanlı Al ₂ O ₃ zırh sisteminde mermi çıkış sonrası arka görüntüsü	67
Şekil 5.36: Katman sayısına göre merminin sistemi terk ediş hız	68
Şekil 5.37: 13 mm kalınlığındaki sistemde mermi çıkış sonrası ön görüntüsü	69
Şekil 5.38: 13 mm kalınlığındaki sistemde mermi çıkış sonrası arka görüntüsü	69
Şekil 5.39: 13 mm kalınlığındaki 1 µs Sonrası oluşan gerilmeler	70
Şekil 5.40: 13 mm kalınlığındaki 2 µs Sonrası oluşan gerilmeler	70
Şekil 5.41: 13 mm kalınlığındaki levhada hasar durumu (izometrik görünüş)	71
Şekil 5.42: 13 mm kalınlığındaki sistemde alüminyum levhanın esneme miktarı	71
Şekil 5.43: 13 mm kalınlığındaki sistemde mermi hızının zamana bağlı değişimi	72
Şekil 5.44: 14 mm kalınlığındaki sistemde mermi çıkış sonrası ön görüntüsü	73
Şekil 5.45: 14 mm kalınlığındaki sistemde mermi çıkış sonrası ön görüntüsü	73
Şekil 5.46: 14 mm kalınlığındaki 1 µs Sonrası oluşan gerilmeler	74
Şekil 5.47: 14 mm kalınlığındaki 1 µs Sonrası oluşan gerilmeler	74
Şekil 5.48: 14 mm kalınlığındaki levhada hasar durumu (izometrik görünüş)	75
Şekil 5.49: 14 mm kalınlığındaki sistemde alüminyum levhanın esneme miktarı	75
Şekil 5.50: 14 mm kalınlığındaki sistemde mermi hızının zamana bağlı değişimi	76
Şekil 5.51: 15 mm'lik sistemde mermi çıkış sonrası ön görüntüsü	77
Şekil 5.52: 15 mm kalınlığındaki sistemde mermi çıkış sonrası arka görüntüsü	77
Şekil 5.53: 15 mm kalınlığındaki 1 µs Sonrası oluşan gerilmeler	78
Şekil 5.54: 15 mm kalınlığındaki 2 µs Sonrası oluşan gerilmeler	78
Şekil 5.55: 15 mm kalınlığındaki levhada hasar durumu (izometrik görünüş)	79
Şekil 5.56: 15 mm kalınlığındaki sistemde alüminyum levhanın esneme miktarı	79
Şekil 5.57: 15 mm kalınlığındaki sistemde mermi hızının zamana bağlı değişimi	80
Şekil 5.58: 16 mm kalınlığındaki sistemde mermi çıkış sonrası ön görüntüsü	81
Şekil 5.59: 16 mm kalınlığındaki sistemde mermi çıkış sonrası ön görüntüsü	81
Şekil 5.60: 16 mm kalınlığındaki 1 µs Sonrası oluşan gerilmeler	82
Şekil 5.61: 16 mm kalınlığındaki 2 µs Sonrası oluşan gerilmeler	82
Şekil 5.62: 16 mm kalınlığındaki 3 µs Sonrası oluşan gerilmeler	82
Şekil 5.63: 16 mm kalınlığındaki levhada hasar durumu (izometrik görünüş)	83
Şekil 5.64: 16 mm kalınlığındaki sistemde alüminyum levhanın esneme miktarı	83
Şekil 5.65: 16 mm kalınlığındaki sistemde mermi hızının zamana bağlı değişimi	84

KOMPOZİT-ZIRH ETKİLEŞİMİNİN ANALİZİ

ÖZET

İnsanlık tarihi boyunca zırh sistemleri çok önemli bir konuma sahip olmuştur. Çünkü devletler yıllarca birbirleriyle mücadele içerisinde olmuş ve sürekli silah anlamında kendilerini geliştirmek durumunda kalmışlardır. Silah konusunda yaşanan bu gelişmelere paralel olarak savunma anlamına gelen zırhlarda gelişim göstermek mecburiyetinde kalmıştır. İlkel çağlarda zırh malzemesi olarak daha çok çelik ve telden oluşan sistemler kullanılırken günümüzde teknolojinin sağlamış olduğu avantajlarla birlikte zırh sistemlerinde de önemli bir gelişme kaydedilmiştir.

Bu çalışmada amaç olarak $Al_2O_3/Al2024$ malzemelerden oluşan kompozit zırhın optimum kalınlığı simülasyon yöntemi kullanılarak belirlenmeye çalışılmıştır. İlk olarak hangi parametlerin kullanılacağı belirlenmiştir. Elde edilen parametre sonuçları yorumlanmış ve sonuçlara göre modellemeye geçilmiştir.

İlk olarak parametleri belirlenen parametreler analiz programında karşılaştırılmıştır. Parametre olarak sınır şartları, ısıtılma durumu, yapıştırıcı etkisi ve katman sayısı gibi faktörlerin sistem üzerindeki etkileri incelenmiş, elde edilen sonuçlara göre ikinci aşama olan seramik/alüminyum oranı hesaplanmıştır.

İlk parametre olan sınır şartları durumu için iki farklı sınır şartı incelenmiştir. İlk olarak sistemin üç ekseninde hareket etmesi engellenmiştir. İkinci durumda ise merminin geliş yönünde hareketi engellenip diğer yönlerde hareket etmesine izin verilmiştir. Böylece sistemde ön gerilme oluşturulduğu düşünülerek bu gerilmelerin etkisi değerlendirilmiş ve çalışmadaki sınır şartına karar verilmiştir.

İkinci parametre olarak ısıtılma durumunun zırh sistemine etkisi incelenmiştir. Bu çalışmada alüminyum, T3 fazındaki alüminyum malzeme ile T4 fazındaki alüminyum malzeme karşılaştırılmıştır. Böylece verilecek yapılacak çalışmada kullanılacak alüminyum malzeme belirlenmiştir.

Üçüncü parametre olarak ise yapıştırıcı kullanılarak çalışma yapılmıştır. Bu çalışmada üç farklı durum incelenmiştir. İlk durum olarak yapıştırıcı kullanılmamış, ikinci durumda 1 mm kalınlığında yapıştırıcı kullanılmış ve üçüncü durum olarak 2 mm kalınlığında yapıştırıcı kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre zırhda yapıştırıcı kullanılmalı mı, kullanılacaksa bu kalın mı yoksa ince katmanlı mı olmalı sorusunun cevabı belirlenmiştir.

Son parametre olarak da aynı kalınlıktaki malzemeyi tek ve katman katman ayırarak katman sayısının zırh üzerinde etkisi incelenmiştir. Üç farklı çalışma gerçekleştirilmiştir. Tek katmanlı, iki katmanlı ve üç katmanlı olmak üzere üç farklı durum incelenmiştir. Bu parametrenin incelenme amacı ise katman sayısının malzeme üzerinde etkisi olup olmadığı anlaşılmaya çalışılmıştır.

Bu çalışmada steel 4340 çelik malzemeden yapılmış mermi ile atışlar gerçekleştirilmiştir. Mermi için malzeme modeli olarak Johnson-Cook dayanım modeli ve Johnson-Hasar modeli kullanılmış ve teorik olarak bu modeller açıklanmıştır.

Seramik levha malzemesi olarak Al_2O_3 malzemesi seçilmiştir ve bu malzeme içinde Johnson-Holmquist dayanım modeli ve Johnson-Holmquist kırılma modeli modeli kullanılmış ve teorik olarak bu model açıklanmıştır.

Alüminyum malzeme olarak T4 fazına ısıtılma işlemi görmüş Alüminyum 2024 malzeme seçilmiştir.

ANALYSIS OF PROJECTILE-ARMOUR INTERACTION

SUMMARY

Fighting and wars between societies throughout human history have occurred many times in history, and it does appear that the various sections of humanity will continue to occur as there are. They heard about the need to defend themselves in these struggles, people and technology, to the extent permitted time have developed a variety of methods. This is the first centuries protection is ok, like the bow and the sword of war against vehicles, while the invention of gunpowder and explosives with the new requirements have emerged that require different protection technologies. For example, at first, as the armor material used in a variety of metals and steel, along with the development of technology today, Al_2O_3 , SiC , B_4C composite structures containing hard ceramic layers are widely used. At the moment, the more durable, and lighter armor that makes it possible to produce composite structures, tanks, helicopters, aircraft, warships, such as the production of armor for military vehicles and personnel protection they deem a wide range of applications.

This armor structures, the outer parts of the ceramic plate, consists of layers of composite or metal on the inside. Ceramic layers with high hardness and compressive strength, due to erosion and fragmentation of the bullets that hit them and they perform a task in the form of the destruction of ballistic impacts. Therefore, the bullet taken from the first pulse, his head has been destroyed, and a large part of the energy of the initial phase of the projectile after absorbing side of the ceramic plate are blocked through the composite layer. In addition, due to much lower densities much lighter than steel structures forms. However, the major disadvantages of ceramics is that they are fragile, so it can not be used alone. Be supported in a layer of metal or composite. Thus, a very hard and tough outer plate, elastic and shock-absorbing inner layer of a composite structure consisting of a more functional is concerned. The lower layer, the remaining energy of the bullet as well as to support the absorption of the ceramic plate, ceramic plate breakage caused by collision fragments carries out a task as keeping.

Bullet / armor interaction will be examined more closely if the bullet end portion of the first stage have been destroyed without penetration of the ceramic plate can be seen. During this process, pressure shock waves caused by the impact is moving towards the back of the ceramic plate. This is caused by stress waves at the back of the plate and the ceramic cone-shaped broken. This cone angle varies depending on the properties of materials and the bullet at the beginning of the bullet due to erosion of the ceramic plate and ceramic particles of jamming coup against the tip of the bullet shows in real-time rigid behavior and excessive plastic deformation reveals the failure.

In the second stage, the bullet enters the cone-shaped armor progression of the broken pieces of ceramic parts, leads to the spread sideways. Meanwhile armor begins to be deformed elastically.

In the third stage, the ceramic has been fully broken and bullet has been contacted with aluminum supporter block. The aim of this block is support to ceramic. When bullet contact with ceramic, ceramic begin the broken and the same time bending to backside. This block challenge to bending moment. Mechanical properties of block should be strong.

The last stage, bullet penetrate through armor system if bullet energy higher then aluminum damping properties. Chosen backing plate material is ductile material. Since it is not broken and it is act spring.

The aim of this thesis has been investigated to optimum armour thickness which is composed of Al_2O_3 /ceramic material using simulation aspect. Firstly, used parameters have been defined. According to parameters results, armour model has been created.

Firstly, specified parameters have been compared AUTODYNA programme. Specified parameters are boundry conditions, heat treatment affect, adhesive thickness affect and layers number (in this parameter, thickness has not been changed, only material has been divided two and three layers, respectively). In this stage, effect of parameters have been invastigated on the armour system. Secondly, according to parameters results, armour model has been created and optimum Al_2O_3 /ceramic thickness has been attained.

Parameter which chosen firstly is boundary conditions. In this stage, two boundary conditions have been chosen. First condition, movement of armor system has been restricted to three axis. Second condition, only one direction movement has been restricted and other two directions have been moved freely. The main goal of this parameter, on the armor has been created to pre-stress. Pre-stress affect has been investigated. As a result of analysis, boundary condition has been chosen.

As second parameter, heat treatment condition has been chosen and affect of heat treatment condition has been investigated. Two different heat treatment condition which is T3 phase and T4 phase aluminum plate has been preferred. Aim of this parameter investigate to answer of question of how does affect strength of support plate. After analysis results, backing plate material condition has been decided.

The another parameter is adhesive thickness. In this stage, three different conditions have been defined. First step no adhesive was used, second step 1 mm thickness ashesive was used and the last step 2 mm thickness adhesive was used. The aim of chosen this parameter, to determine whether or not adhesive is required or if required, should it thick or thin.

The last prameter to chosen, layers status. In this and last stage three different layers effect has been investigated. Backing plate thickness has not been changed. But backing plate has been divided two and three layer, respectively. Three different which is composed of one layer, two layers and three layers model has been cretaed. Analysis results has been compared and according to result backing plate layer has been determined.

Designated bullet diameter is 6.17 mm, length is 27,4 mm. Bullet material has been chosen hard core steel in AUTODYNA library. The 7.62 mm APM2 Bullet compose of brass jacket, an end cap, lead filler, and hard steel core. Because the brass jacket and lead filler had a relatively small effect on the perforation process, jacket and filler was ignored and only hard steel core designated. For bullet, Johnson-Cook strength model and Johnson-Cook damage model has been used. Models have been

clarified as theoretical. Bullet has been designated to quarter model at ANSYS Workbench programme.

For front material, Al_2O_3 ceramic material has been chosen. Because this material both has a lower density and cheap and find easily. For parameter conditions ceramic thickness has not been changed; however, to find optimum thickness ratio thickness has been varied 9 to 12 mm thickness. For Al_2O_3 ceramic front plate Johnson-Holmquist strength model and Johnson-Holmquist failure model has been used. Models have been clarified as theoretical. Ceramic plate has been designated as quarter model at AUTODYNA programme. Material has been chosen AUTODYNA library.

Chosen last material is aluminum. Aluminum 2024-T4 phases has been used for backing plate. Aluminum material has been heat treated up to T4 phase. Al2024-T4 material has been designated as quarter model at AUTODYNA programme. Material has been chosen AUTODYNA library.

1. GİRİŞ

İnsanlık tarihi boyunca devletler hep birbirleriyle mücadele içerisinde olmuşlardır. Bu mücadele içerisinde yeni savaş teknikleri geliştirmişler ve buna paralel olarak yeni savaş araçları ortaya çıkmıştır. İlk zamanlarda insanlar ok, kılıç ve mızrak ile savaş yaparken savunma alanında ise çelik ve tellerden oluşan zırh sistemlerini kullanmaktaydılar.

İlk zamanlarda yüksek dayanımlı çelik tabakalardan oluşan tek tip zırh malzemesi kullanılıyordu. Bu tip zırhlarda hareket kabiliyeti kısıtlıydı. Fakat ilerleyen zamanlarda minimum ağırlıkla maksimum balistik korumayı sağlamak amacıyla çok katmanlı zırh tasarımları üzerinde çalışıldı. Seramik ve polimer esaslı kopozitlerden oluşan zırh sistemleri kullanılmaya başlandı [1].

Son yıllarda yapılan araştırmalarda seramik gibi metal olmayan yapılar kullanılmaya başlanmıştır. Çünkü bu malzemeler sadece düşük yoğunlukta ve yüksek sertlikte değil aynı zamanda yüksek rijitlik ve yüksek sıkışma dayanımlarına da sahiptir [2].

Farklı malzemelerin birleşmesiyle elde edilen zırh sistemlerinde araştırma yapılmasının amacı hem hafiflik sağlayarak enerji kaybını azaltmak hem de kolay hareket kabiliyetini arttırmaktır. Çelik malzemeler yüksek dayanımlarının yanı sıra tokluk ve düşük maliyetleri nedeniyle de iyi bir seçim olarak görülmektedir. Ayrıca çeliklere ısıtma işlemi, soğuk şekil verme işlemleri gibi farklı prosesler uygulayarak da dayanımlarını arttırmak mümkündür [3].

Çelik malzemeler veritabanlarına kolay ulaşılması ve ucuz maliyetlerde üretilmeleri tercih edilme sebebiydi. Buna ilave olarak çok farklı mekanik özellikleri elde edilebiliyordu. Fakat çeliklerin yoğunluklarının yüksek olması nedeniyle çok fazla zırh malzemesi olarak kullanılmaya uygun değildi. Bu nedenle araştırmacılar farklı yapılardan oluşan zırh sistemleri üzerinde çalışmaya yoğunlaşmışlardır [4].

Tabakalı kompozit malzemelerin zırhlarda önemli derecede hafiflik sağlamaları sebebiyle zırh sistemlerinde önemli bir yere sahip olmuşlardır. Bu tip sistemlerde ön kısımda seramik ön tabaka ve seramik veya kompozit malzemeden oluşan bir destek

plakası vardır. Tek tip elik zırhlarla kıyaslandığı zaman bu tip sistemler önemli derecede hafiflik sağlamaktadır. Seramik levha mermi ile etkileşim içerisine girdiğı zaman, merminin etkisiyle kırılmakta ve koni şekli ortaya çıkmaktadır. Bu koni çarpma etkisiyle oluşan basıncı azaltmaktadır ve bu şekilde arkadaki destek plakasına gelen basıncı düşürmektedir. Ayrıca seramik levha mermiyi aşındırarak hızınında düşmesini sağlamaktadır. Arka kısımda bulunun kompozit veya metal malzemeden oluşan destek plakasının görevi ise enerjisinin büyük bölümünü çarpma ile kaybetmiş olan merminin geriye kalan enerjini absorbe ederek merminin tutulmasını sağlamaktır [5].

Tabakalı kompozitten oluşan sistemlerde merminin darbe hızını etkileyen faktörler; seramik levhanın sertliğı, yoğunluğu ve kırılma tokluğu iken, destek plakasının sertliğı ve rijitliğı önemli bir etken olmaktadır [5].

1.1 Tezin Amacı

Bu çalışmada seramik ve farklı mekanik özelliklere sahip alüminyum malzemelerden oluşan kompozit zırh sisteminin davranışı incelenmiştir. Malzeme boyutlarının, sınır koşullarının, katman sayısının ve yapıştırıcı kullanılmasının malzemeye nasıl etki ettiğı nümerik sonuçlarla ulaşılp değerlendirilmiştir. Yapılan alışmalar sonucunda optimum kalınlıkta ve hafiflikte zırh tasarlanması amaçlanmıştır.

2. ZIRH YAPIMINDA KULLANILAN MALZEMELER VE MÜHİMMATLAR

2.1 Zırh Yapımında Kullanılan Seramik Malzemeler

Seramik malzemeler özellikle son yirmi yılda zırh tasarım araştırmalarında önemli bir konuma gelmiştir. Çünkü bu malzemelerin iki önemli özelliği vardır ki bu tercih edilme nedenidir. Hem yoğunluklarının düşük olması sebebiyle hafif olmaları hem de dayanımlarının yüksek olmalarıdır.

Balistik performans malzeme kalınlığı ve mermi hızına bağlı olarak etkilenmektedir. Ayrıca balistik korumalara karşı daha dayanıklı bir sistem düşünüldüğü zaman daha yüksek hızlardaki mermiler için daha kalın malzeme düşünülmelidir [6].

Merminin zırha temas ettiği anda darbe hızı, parçalar arası etkileşimin geometrisi ve hem mermi hem de malzeme özellikleri gibi farklı özellikleri hesaba katmak gerekir [6].

2.1.1 Seramiklerin genel özellikleri

Seramik malzemeler balistik korumalara karşı önemli bir role sahiptir. Çünkü zırh tasarımında kullanılması için malzemelerde olması gereken temel özellikler yoğunluğunun düşük olması buna bağlı olarak hafif olmaları, hacimli ve yüksek kesme mukavemetine sahip olmaları yüksek deformasyona uğramalarına engel olmakta, akma gerilmelerinin yüksek olması zırhlarda hasar oluşmasını engellemekte, yüksek dinamik çekme gerilmelerine sahip olmaları çekme dalgaları ortaya çıktığında yırtılmaya karşı direnç göstermektedir.

DeneySEL çalışmalardan yapılan gözlemlere göre seramik malzemeler hafif süneklik gösterirler ve basınç, kohezyon ve sıkıştırma davranışlarına göre malzemelerde kesme gerilmesinin artmasına neden olurlar. Bu malzemeler mermide hasara, çatlak ilerlemesine, seramik yapının güçlenmesine neden olur.

Seramik malzemelerin avantajları yanısıra bazı dezavantajları da vardır. Bu dezavantajları sebebiyle seramikleri tek başlarına zırh malzemesi olarak kullanmak

mümkün olmamaktadır. Seramiklerin dezavantajları eğme dayanımlarının ve çekme dayanımlarının düşük olması sebebiyle kırılğan bir yapıya sahip olmalarıdır.

2.1.1.1 Alumina (Al_2O_3) seramik levhaları

Alumina diğer bir değişle alüminyum oksit maliyet etkisi açısından diğer malzemeler ile kıyaslandığında balistik korumalarda en çok tercih edilen seramik levha türüdür. Alüminanın yüksek mekanik özelliklere sahip olması da kullanılması açısından etkilidir. Piyasada farklı saflıkta alumina %95, %99.7 gibi farklı saflıkta malzeme görmek mümkündür.

Seramik malzemelerin balistik koruma mekanizmaları metaller ile kıyaslandığı zaman oldukça farklıdır. Çünkü metallerde bu mekanizma plastik deformasyon ile malzemenin mermi enerjisini absorbe etmesiyle ortaya çıkarken, seramik malzemelerde merminin kinetik enerjisi kırılma enerjisi mekanizmasıyla absorbe edilir. Günümüzde seramik malzemeler ile birlikte destek malzemesi olarak KevlarTM, SpectraTM veya fiberglass gibi yüksek çekme dayanımı olan fiber lifler ile kullanılmaktadır [7].

Balistik koruma sistemlerini düşünürken tehdit türleri, üretilen zırh sisteminin yetenekleri ve zırh sisteminin kapasitesi gibi bazı özellikleri de hesaba katmak gerekir [7].

Al_2O_3 malzemelerde elastiklik modülü gibi bazı parametlerin değerlerinin yükselmesi tane yapısıyla ilgilidir. Çünkü tane yapılarının küçülmesi ile daha düzenli bir yapı elde edilip elastiklik modülü, eğme dayanımı gibi darbe anında etkili olan parametleri değiştirebiliriz. Ayrıca içerisindeki Al_2O_3 miktarının artması da malzemenin sertlik değerinin artmasına yardımcı olur. Tahmin edileceği gibi daha ince taneli yapıların elde edilmesi ile daha düzenli bir yapı ortaya çıkacak, bunun sonucunda sertlik değeri ve bazı fiziksel özelliklerinde artış gözlemlenecektir [8].

Çizelge 2.1 : Çeşitli yoğunluklardaki Al_2O_3 malzemelerin mekanik ve fiziksel özellikleri [8].

Özellik	Al97ML	Al98	Al98.5	Al99.6
Yoğunluk (g/cm^3)	3.74-3.76	3.78-3.82	3.81-3.84	3.90-3.91
Elastiklik Modülü (GPa)	280-300	320-360	370-420	400-450
Sonik Hız (km/s)	9.5-9.9	10-10.5	10.6-11.3	10.7-11.6
Vickers Sertliği (kg/mm^2)	1230-1260	1250-1330	1320-1420	1520-1560
Kırılma Tokluğu ($MPa.m^{1/2}$)	3.0-3.3	3.2-3.3	3.3-3.4	3.1-3.4
Eğilme Dayanımı (MPa)	-	250-350	270-360	320-380



Şekil 2.1: Seramik zırh sistemleri için çeşitli örnekler [8].

2.1.1.2 Bor karbür (B₄C) seramik levhaları

Bor karbür malzemeleri günlük hayatta çok sık kullandığımız malzemelerin başında gelmektedir. Seramik plakalardan fayansa, laboratuvar ekipmanlarına kadar bir çok kullanım alanı vardır. Ayrıca bor karbür farklı malzemeler ile birleştirilerek de özellikleri geliştirilebilir.

Bor karbürün ilk olarak kullanıldığı yer Vietnam savaşı sırasında, zırh sistemlerinin kullanılması için geliştirildiği ve 1960'ların ortalarında hem piyadelerde hem de askeri araçlarda kullanılmaya başlandığı bilinmektedir. Yapılan çalışmalarda ortaya çıkan sonuçlara göre bor karbür kullanılarak yapılan zırh sistemleri % 20 hafiflik sağlamaktadır [9].

Bor karbür malzemeleri yüksek dayanıma ve düşük yoğunluğa sahip malzemelerdir. Bu sebeple diğer seramik malzemeler ile kıyaslandığı zaman hem daha hafiftirler hem de dayanımları daha yüksektir.

Çizelge 2.2 : Bor Karbür'ün mekanik ve fiziksel özellikleri[8].

ÖZELLİK	BOR KARBÜR
Yoğunluk (g/cm ³)	2.4-2.5
Elastiklik Modülü (GPa)	450
B ₄ C Miktarı	%98.5-99.5
Vickers Sertliği (Mpa)	2800-3200
Kırılma Tokluğu (MPa.m ^{1/2})	2.5-3
Eğilme Dayanımı (Mpa)	400-420

Bor karbür malzemelerinin atomları arasındaki bağlar çok güçlüdür. Bu sebeptir ki bu malzemelere sinterleme işlemi kolay uygulanmaz. Sinterleme hızı, katıların hızına, partikül şekillerine ve boyutlarına bağlıdır. Bor Karbür tozları HP sıcak presleme, sıcak izostatik presleme ve sinterleme yöntemleriyle şekillendirilirler. Bor karbür malzemelerinin bu kadar iyi özelliklerinin yanı sıra iki tane de önemli

dezavantajını söylemek mümkündür. Bunlar sertliklerinin yüksek olması sebebiyle kırılğan bir yapıya sahip olmaları, diğer bir dezavantajı da maliyetlerinin yüksek olmasıdır [8].

Bor karbür birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu alanlardan kısaca bahsedecek olursak; aşınmaya dayanıklı makina parçaların üretiminde, helikopter koltuklarında ve zırh malzemesi olarak balistik darbelere karşı korumada, kimyasal olarak uygulamalarda, termokople yapımında kullanılarak elektrik uygulamalarında ve nükleer uygulamalarda kullanılmaktadır [10].

2.1.2 Seramik levhaların çalışma prensipleri

Zırh malzemelerinin tasarımında bazı kriterleri göz önünde bulundurmamız gerekmektedir. Sistemin ağırlığını azaltmak için düşük yoğunluk, çarpma sonucunda gerilme dalgaları oluştuğu zaman malzemenin kopmasını önlemek için yüksek dinamik çekme dayanımı, büyük deformasyonları önlemek için yüksek kayma mukavemeti, zırh dayanımını sağlamak için yüksek akma mukavemeti gerekir [11].

Seramik malzemeler çelik malzemeler ile kıyaslandığı zaman yoğunluk bakımından daha düşük değere sahiptir. Fakat gevrektiler ve en ufak temas halinde kırılırlar. Bu yüzden seramik malzemelerin tek başlarına zırh malzemeleri olarak kullanılması imkansızdır. Bu yüzden seramik zırhlar hep destek katmanlarıyla desteklenirler. Bu katmanlar çoğu zaman fiber takviyeli kompozit malzeme olmaktadır. Fakat alüminyum alaşımlı malzemeler de kullanmak ve literatürde görmek mümkündür.

Seramik malzemeler düşük yoğunluk, yüksek hacim ve kesme mukavemeti ve yüksek akma mukavemetlerine sahip olmalarına rağmen kırılğan olmaları sebebiyle hafif ve sünek malzemeler ile daha dayanımlı bir yapı oluştururlar. Seramik malzemeler seramiğin kırılmasının sınırlandırılması ve mermi enerjisinin absorbe edilmesini sağlamak için destek plakaları ile mükemmel bir yapı elde edilebilir. Böylece çok fazla ağırlık artışı meydana gelmeden sağlam bir yapının elde edilmesi mümkün olmaktadır.

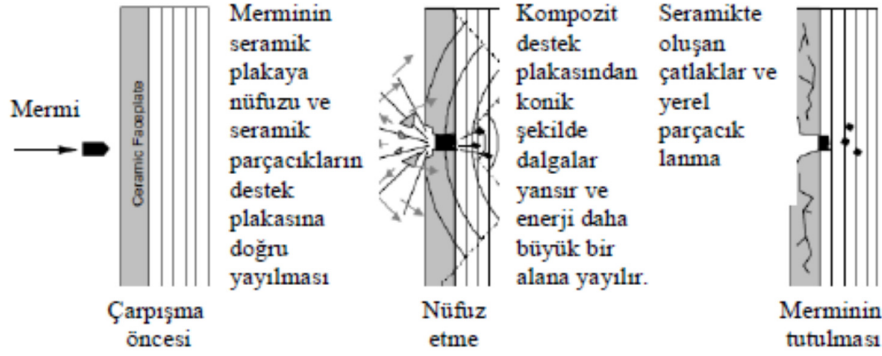
2.1.3 Seramik levhaların kırılma prensipleri

Seramik malzemelerde kırılma olayı;

- Merminin hasara uğraması,

- Hedef ile mermi temas ettiği andan itibaren konik bir yapının ortaya çıkması,
- Seramiğin destek plakaya temas etmesiyle, destek plakada akmanın meydana gelmesi.
- Seramiğin hareketinin devam etmesiyle, destek plakada eksenel kırıkların meydana gelmesi.

Seramik malzeme mermi ile ilk temas anında merminin kinetik enerjisini azaltır ve merminin kafasına hasar verir. Bu başlangıç anında kinetik enerji sönümlenmesi oluşur. İkinci aşamada sünek yapıdan oluşan destek plakası geriye kalan kinetik enerjiyi absorbe eder ve merminin durdurulmasını sağlar.

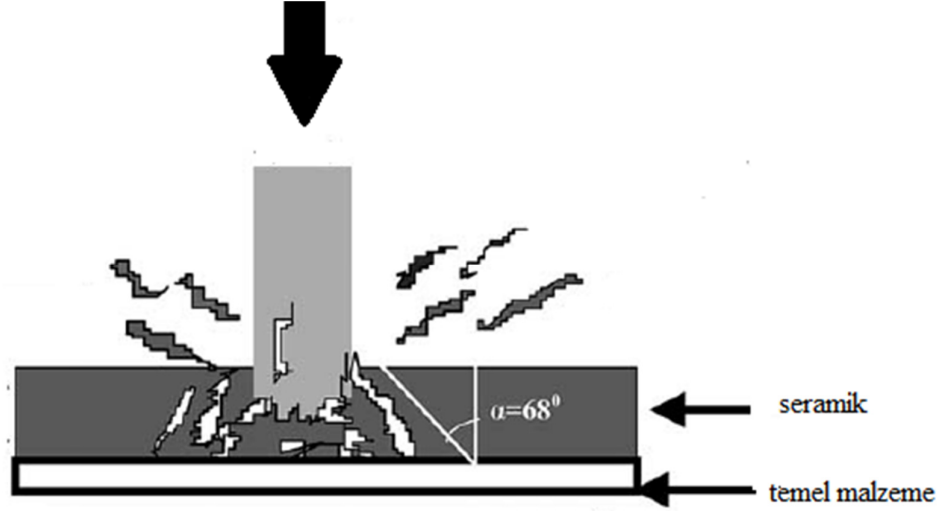


Şekil 2.2 : Seramik/kompozit yapının çalışma prensibi[8].

2.1.3.1 Merminin hasara uğrama aşaması (ilk aşama)

Başlangıç aşamasında, seramik katmanda penetrasyon oluşmadan merminin kafası hasara uğrar ve seramik katmanda konik şeklinde kırık bir yapı oluşur. Bu aşamada merminin darbe enerjisiyle şok dalgaları oluşur ve bu dalgalar seramik kalınlığı boyunca hareket eder. Bu dalgalar seramik katmanın arka kısmından çekme gerilmesi olarak yansır ve konik şeklinde kırılmanın meydana gelmesine sebep olur. Bu konik açı mermi ve seramik malzemenin elastik özelliklerine bağlıdır [12].

Bu aşamada mermi darbesinin etkisiyle seramik malzemenin kalınlığı boyunca hareket eden baskı yönünde şok dalgaları oluşturur. Bu dalgalar plakanın arka kısmında çekme etkisi yaratır ve seramiğin kırılmasına etki eder ve konik şeklinde kırılmaya neden olur. Bu konik yapının açısı mermi ve seramik malzemenin elastik özelliklerine bağlıdır [12].



Şekil 2.3 : Seramik malzeme içerisine doğru ilk penetrasyon [12].

2.1.3.2. Mermi enerjisinin absorbe edilme aşaması (ikinci aşama)

Bu aşamada mermi seramik katmandan penetre olarak hareketine devam eder ve konik şeklindeki yapı seramik parçalarının yayılmasına neden olur. Bu sırada destek plakasında elastik şekil değişimi meydana gelir. Bu bölümde hız ikiye bölünür. İlk olarak mermi arka hızında devam etmeye çalışır fakat seramik-mermi temas hızı daha düşüktür. Bu yüzden mermide erozyon meydana gelir. Devamında ise destek plakanın hızı ve mermi-seramik temas hızının farkında dolayı ortaya çıkan farktan penetrasyon miktarı hesaplanır [12].

Bu aşamada iki adımdan bahsedebiliriz. Bunlardan bir tanesi merminin erozyona uğrama aşaması, diğeri ise destek plakasında meydana gelen konik yarıdır.

2.1.3.2.1. Merminin erozyona uğraması

Bu aşamada mermi ile seramik arasındaki etkileşim sonucu ortaya çıkan basınç iki malzemenin de akma mukavemetinden daha yüksektir. Tate [16], bu yüzden merminin dinamik akma ve seramik penetrasyona karşı direncini gösteren iki sabit değeri düzenleyerek hidrodinamik teoriyi geliştirmiştir. Eğer darbe basıncı merminin akma noktasını geçerse mermi solid katı body şeklinde hareket edecek ve hidrodinamik kurallara göre akışkan şeklinde davranacaktır. Aynı şekilde hedef malzemede seramik penetrasyon direnç değerine ulaştığı zaman aynı kurallar geçerli olacaktır [12].

2.1.3.2.2. Destek plakasında meydana gelen plastik deformasyon

Bu aşamada, plastik deforme olan alüminyum, çelik gibi destek malzemeleri merminin geriye kalan kinetik enerjisini absorbe eder. Darbe anında mermi ilerleyerek tabakaya penetre olur ve bu da sünek malzemenin plastik defromasyona uğramasında neden olur. Tabiki bu durum merminin hızıyla alakalıdır. Eğer mermi düşük hızla ilerliyorsa böyle bir şekil ortaya çıkmaz. Fakat merminin hızı yüksek ise mermi plakayı da delip geçebilir [12].



Şekil 2.4 : Sünek malzemede meydana gelen konik şekil [12].

2.2. Destek Plakası Olarak Kullanılan Sünek Malzemeler

Alüminyum alaşımlı levhalar yoğunluklarının düşük olması, yüksek enerji emiş kapasitelerine ve yapısal mukavemetlerinin yüksek olması nedeniyle uçak, bina ve köprüler gibi farklı alanlarda tercih edilmektedirler. Zırh çelikleri, titanium ve alüminyum alaşımları yaygın olarak kullanılan metal zırh malzemeleridir. Bu malzemeler sertlik değerleri bakımından oldukça yüksek seviyelerdedir. Düşük kalınlık ve birim maliyeti açısından bu malzemelerin kullanılması avantaj olsa da, yüksek yoğunlukları olması dezavantajlarıdır [13].

Zırhlar sadece insanların korunması için değil aynı zamanda hava, deniz ve kara araçlarının korunması açısından da vazgeçilmez birer unsurdur. Başlangıçta sadece tek tip sertleştirilmiş plakalar kullanılarak araçlar korunmaktaydı. Tek tip malzeme kullanılmasında metalin yoğunluğunun yüksek olması ağırlık bakımında dezavantaj yaratmaktaydı. Daha sonraları araştırmacıların yapmış olduğu geliştirmeler ile yeni zırh türleri ortaya çıktı. Bu sistemlerde darbe direnci yüksek seramik levha ön

katman olarak, sünek yapıdan oluşan çelikler de destek katman olarak kullanılmaya başlandı.

Sünek malzemeler şekil değişimi belirli bir eşik değerine ulaştığı zaman ya çekme yada kesme kuvvetinin etkisinde hasara uğrarlar. Numunede meydana gelen hasar iç yüzeyde birbirleriyle temas halinde olan partiküller arasındaki bağın kaybolmasıyla ortaya çıkar. Çekme altındaki kırılma, yapıda bulunan boşlukların birleşmesiyle meydana gelir. Kesme kuvveti altındaki kırılma ise yüksek kesme gerilmelerinin bulunduğu bölgelerde kesme bantlarının görünümü sonucunda ortaya çıkar. Bu bantlar çok küçük bir bölgede bulunurlar ve bantlardaki kesme gerilmelerinin belli bir değeri aşması sonucunda hasar ortaya çıkar [14].

Zırh sistemlerinde yapılan araştırmalar son yıllarda zırhın hafifliğini sağlamak üzere yoğunlaşmıştır. Çünkü kullanıcıya hem daha rahat manevra kabiliyeti sağlayacak hem de enerji tasarrufu sağlayacaktır. Son yıllara kadar yapılan araştırmalarda çelikler zırh malzemesi olarak tercih edilmekteydiler. Çünkü bu malzemelerin dayanımları yüksek, kırılma toklukları iyi ve maliyetleri düşüktür. Fakat bu malzemelerin yoğunluklarının yüksek olması nedeniyle daha hafif yapılarda dayanımlarını arttırmak amacıyla ısıtılma veya soğuk şekillendirme ile üretilme gibi yeni imalat yöntemleri geliştirilmiştir. Yüksek dayanımlı alüminyum alaşımlı malzemeler düşük yoğunlukları ve yüksek gerilme dayanımları nedeniyle hafif ağırlıklı zırh tasarımlarında çoğunlukla tercih edilmektedir [3].

Balistik tehditlere karşı zırh malzemesinin seçiminin önemli noktalarında birisi sadece korumaya karşı etki değil aynı zamanda hafiflikte sağlayabilmektir. Zırh malzemesinin seçiminde aşağıdaki parametreler önemlidir:

- Fiyat,
- Balistik performansı,
- Tasarım,
- Kullanım alanı,
- Bakımı,
- Ağırlık,

Ayrıca 7075 ve 7017 alüminyum alaşımlı malzemelerde dayanım/ağırlık oranları arasındaki özelliklerinde dolayı son zamanlarda yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır [15].

Günümüzde sivil uygulamalar içinde güvenli ürün talebi artmıştır. Bu yüzden darbe mekaniğini ve meydana gelen durumları çok iyi anlamak gerekmektedir. Bu tip uygulamalarda fiber destekli kompozit malzemelerde uygun malzeme olarak kullanılabilir. Fakat bu tip malzemelerin darbe yükleri karşısında tam olarak nasıl bir davranış sergileyeceği tam olarak kestirilememektedir. Sadece alüminyum veya çelik malzemeleri kullanmakta yüksek yoğunluğa sahip olmalarında dolayı fazla ağır olmaları sebebiyle tercih edilmemektedir.

Belirli bir sertlik değerine sahip seramik malzeme ile düşük yoğunluklarını hesaba katarsak alüminyum malzemeler ile birleştiği zaman mükemmel bir kombine oluştururlar. Seramik burada merminin enerjisini düşürür, merminin kütlesini azaltır, mermiyi parçalar ve sünek malzemeye de sadece geriye kalan enerjiyi absorbe etmek kalır.

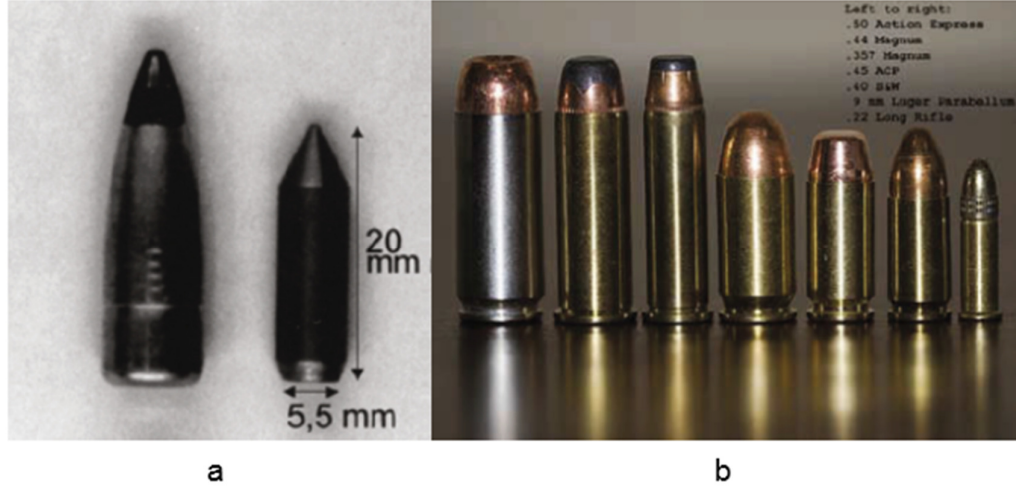
2.3 Mühimmatlar

Personal veya askeri uçak veya araçlarda kullanılan zırhlar farklı tehditlere karşı koruyucu amaçla üretilmektedir. Tabanca ve yivli tüfekleri bu tür tehditlere karşı örnek olarak gösterebiliriz. Zırh tasarımını yapmak için zırhı etkileyecek karakteristik durumların etkilerini iyi bilmek gerekir [16].

2.3.1 Tabanca ve yivli tüfek mermileri

Geleneksel mermiler kurşunda yapılmaktaydı. Çünkü kurşun yandığı zaman yüksek yoğunluğundan dolayı fazla enerji verir ve bu da karşdakine daha fazla hasar anlamına gelir. Fakat bu kurşunun dezavantajı kolaylıkla deforma olabilmesidir. Bu da mermi ucunun düz şekli almasına ve enerjinin büyük bir alana yayılması manasına gelir. Daha sonra The Hauge Convention bu kurşunun üzerini tamamen metal ceketten oluşan bakır ile kapattı ve merminin uç kısmındaki mantar yapıya benzeyen kısımda azalttı. Bakır malzeme merminin etkileşim anındaki sürtünme sırasında oluşan yüksek ısıdan zarar görmesini önlemektedir [16].

Mermi ucundaki mantarimsı yapı kinetik enerjinin mermiden hedefe aktarılmasını sağlar. Fakat bu tip mermiler yumuşak hedefler için idealdir. Sert çelik gibi malzemelere karşı bu mermilerin dayanımı düşüktür. Bu yüzden zırh delici mermilerin çekirdekleri tungsten karbür, uranium, karbür ve sert çelik gibi malzemelerden seçilir [16].

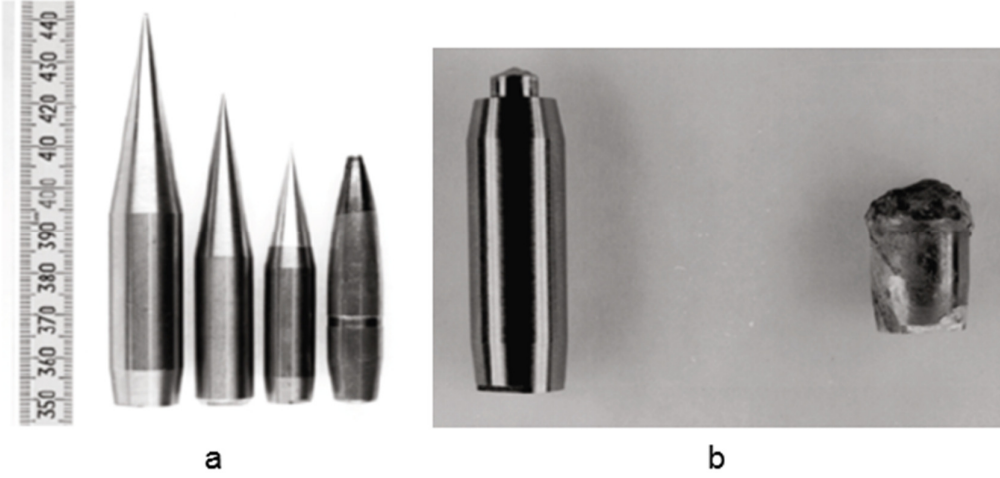


Şekil 2.5 : a) 7.62 mm çapında tungsten karbür çekirdekten oluşan zırh delici mermi
b) Farklı tabanca kartuşları [16].

2.3.2 Ağır tüfek mermileri

Ağır silah dediğimiz zaman uzun kalibreli, sabit pozisyonda yüksek ateşleme gücüne sahip mühimmatlar akla gelir. Bu tip mühimmatlar daha çok tank, uçaksavar gibi araçlarda etkilidir. Eğer daha sert çekirdekli malzeme kullanılırsa, merminin hızına ve kütlesine de bağlı olarak hedef üzerinde daha etkili bir penetrasyon gerçekleşir. Mermi içerisindeki impuls etkilerine göre iki kategoriye ayırmak mümkündür;

- Merminin maksimum çapı ile çekirdeğin iç çapı aynı büyüklüktedir. Bu durumda, merminin ön tarafında bir basınç yaratılır ve bu etki arka tarafa doğru ilerler. Bu tip mermilere en iyi örnek şekil 2.6'da gösterilen NATO ülkelerinde kullanılan 12.70 mm ve doğu ülkelerinde kullanılan 14.50 mm'lik zırh delici mermiler gösterilmektedir. [16].



Şekil 2.6 : a) NATO ülkelerinde kullanılan mermi

b) Doğu ülkelerinde kullanılan mermi [16].

- Mermi çapı delik çapında daha küçüktür. Basınç merminin arka yüzeyine ve mermi tabanının arka yüzeyine uygulanır. Bu kategori 20 mm APDS, 25 mm APDS ve 30 mm APDS mermilerini kapsar. Bütün bu malzeler yüksek yoğunluğa ve sertlik değerine sahip tungsten malzemedendir. Tungstenin yoğunluğu kurşun ile kıyaslandığında 1.6 kat daha fazla, çelikten 2.3 kat daha fazladır. Akma gerilmeleri kıyaslandığında kurşundan 80 kat, çelik malzemedendir 2 kat daha fazladır [16].

3. LİTERATÜR ÇALIŞMASI

3.1 Deneysel Çalışmalar

Jena ve diğ. [3] yüksek dayanıma sahip çelik ve 7017 alüminyum alaşımının 7.62 mm deforme olan mermi ile balistik özelliklerini incelemişlerdir. Çelik iki farklı ısı işlem kondisyonunda temin edilmiş ve farklı mekanik özelliklerin malzemenin özelliklerini nasıl etkilediğini ortaya koymaya çalışmıştır. Mermi hızı 830 ± 10 m/sn ile fırlatılmıştır. Yapılan deneysel çalışma sonucunda 200 °C de temperlenmiş zırh çeliğinin balistik performansları diğer malzemelere göre daha iyi bir performans göstermiştir. Yüksek dayanım, yüksek sertlik 200°C de temperlenmiş çelik malzemenin balistik performansını arttırmıştır.

Madhu ve diğ. [17] %95 ve %99.5 saflıktaki alüminyum malzemenin destek plakası yardımıyla 12.7 mm çapında zırh delici mermi (APP) ile balistik performanslarını incelemişlerdir. Deney sonucunda derinlik penetrasyon method (DOP) kullanılarak mermi derinliklerini ölçmeye çalışmışlardır. Daha saf özellikteki alüminyum oksit (%99.5) diğer alüminyum oksite göre (%95) daha yüksek balistik performans göstermiştir.

Hazell ve diğ. [18] farklı ebatlardaki seramik karoların balistik performansı nasıl etkilediğini araştırmışlardır. Farklı ebatlarda, farklı geometrilerde ve farklı üretim yöntemleriyle elde ettikleri silikon karbür seramik levhaların balistik performanslarını araştırmışlardır. 4 adet plaka kullanılmıştır ve Autodyna 2D sonlu elemanlar programı ilede simülasyon çalışmalarını gerçekleştirmişlerdir. Seramik plakanın ebatları büyüdükçe balistik direncinin daha arttığı sonucuna varmışlardır.

Borvik ve diğ. [19] AA6082-T4 alüminyum koruyucu tabakalara küçük askeri silahlar ile dik ve farklı açılarda olmak üzere atış gerçekleştirmişlerdir. Plaka kalınlığı 20 mm ve yumuşak kurşun çekirdeğinden oluşan 7.62x63 mm NATO mermisi ve sert çelikten oluşan 7.62x63 mm zırh delici mermi ile atışları gerçekleştirmişlerdir. Yapılan çalışma sonucunda her iki mermi içinde kritik aç

60°'den daha küçüktür. Sert çelikten yapılmış mermi çekirdeği 30° de penetrasyon sırasında açılal durumdan etkilenmediği sonucuna varmışlardır. Fakat yumuşak çekirdekli mermilerde ise sürekli bir düşüş olduğu gözlemlenmiştir. İki mermi içinde 60° kritik açı olarak belirlenmiştir.

Roeder ve diğ. [20] kompozit zırhlarda yapısal katmanların ve termal artık gerilmeleın darbe direncine karşı etkileri üzerinde incelemelerde bulunmuşlardır. Bu çalışmada farklı kalınlılara sahip iki katlı yapı ile iki farklı yapıştırma tekniği kullanmışlardır. Bir kısmı oda sıcaklığında sertleştirilmiş, diğler kısmı alüminyum levhalarda termal artık gerilme oluşacak şekilde ise yüksek sıcaklıklarda sertleştirilmiştir. Yapılan çalışma sonucunda kalın levhalardaki penetrasyon miktarının ince levhalara kıyasla daha az olduğu görülmüştür. Ayrıca yüksek sıcaklıkta sertleştirme sonucunda oluşan artık gerilmelerin yapı üzerindeki etkisi ise oldukça düşük olduğunu gözlemlemişlerdir. Katmanların darbelere karşı iyi performans göstermesini malzemenin akma dayanımının önemli derecede etkilediği sonucunu çıkarabiliriz.

Übeyli ve diğ. [5] Alumina/Al2024 tabakalı kompozit malzelerin düşük hızlardaki balistik performanslarını incelemişlerdir. 7.62x51 mm zırh delici mermi ile atışlar gerçekleştirilmiştir. Destek plakasının ve yapıştırıcı malzemenin zırh sistemi üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Yapılan çalışma sonucunda alumina ön katman ve Al2024-T6 destek katmanından oluşan sistem yüksek balistik performans göstermiştir. Ayrıca bu alumina/alüminyum kalınlık oranı 1-3 arasında değişmektedir. Kullanılan yapıştırıcılardan poliüretan epoksi ile kıyaslandığı zaman daha iyi performans göstermesine rağmen, yapıştırıcının zırh üzerinde önemli bir etkisi olmadığını gözlemlemişlerdir.

Demir ve diğ. [21] 7075 ve 5083 alüminyum alaşımları ve yüksek dayanıma sahip düşük alaşımlı çelik malzemelerini 7.62 mm zırh delici mermi ile deneysel çalışmasını yapmışlardır ve bu malzemelerin balistik performanslarını incelemişlerdir. Ayrıca sertlik ve malzeme dayanımının balistik performans üzerindeki etkisini gözlemlemek içinde farklı ısııl işlem şartlarında malzemenin mekanik özelliklerini değiştirmişlerdir. Yapılan çalışma sonucunda en iyi balistik performansını 7075-T61 alüminyum alaşımının gösterdiği sonucuna ulaşmışlardır. Ayrıca malzeme sertliği arttıkça mermiye karşı direncinde arttığı gözlemlenmiştir. Çelik malzemelerde ise sertlik arttıkça darbe direnci de artmıştır. Fakat sertlik değeri

50 veya 60 HRC değerini aştıktan sonra malzeme merminin penetrasyonundan sonra kırılğan tarzda hasar oluşmuştur.

Lee ve diğ. [22] seramik/metal sistemlerinde oluşan kompozit zırhın balistik performanslarını incelemişlerdir. Bu çalışmada sistemin alansal yoğunluğu sabit tutulmuş, fakat malzemelerin kalınlıkları değiştirilmiştir. Yapılan alışmalar sonucunda deneysel ve simülasyon çalışmaları birbirine paralellik gösterdiği sonucuna ulaşmışlardır. Zırh tasarımı için bu çalışmaya göre seramik levha destek katmanı oranı 2.5 değerinde çıkmıştır.

Borvik ve diğ. [23] AA5083-H116 alüminyum plakasının farklı kalınlılardaki deneylerini gerçekleştirmişlerdir. Darbe numunesi olarak 20 mm çapında 90 mm uzunluğundaki 53 Rockwell sertlikte konik uca sahip sertleştirilmiş elik kullanılmıştır. Yapılan alışma analitik yaklaşımlarla karşılaştırılmış ve uygun sonuçlar elde edilmiştir. Ayrıca alüminyum malzemeler elik kadar balistik performans gösterdiği bu çalışmalarda gözlemlenmiştir.

Warren ve diğ. [24] 6061-T6511aluminum alaşım malzemeye farklı açılarda atış testleri yapmışlardır. Deneysel alışma sonucunda mermide meydana gelen deformasyonu erozyon parametresini kullanmadan hesaplamak için yeni bir model geliştirmişlerdir. Simülasyon sonuçları deneysel sonuçlar ile karşılaştırıldığı zaman mermide meydana gelen deformasyon benzerlik göstermektedir.

Orphal ve diğ. [25] kenarlarından sabitlenmiş silikon karbür levhaya atışlar gerçekleştirmişlerdir. Bu atışlarda uzun tungsten çubuk ile atışlar gerçekleştirilmiştir. Darbe hızları 1.5 ile 4.6 km/s arasında değiştirilmiştir. Deneyler iki kademeli gaz tabancası kullanılarak tersine balistik modunda gerçekleştirilmiştir. Bu yöntemin dezavantajı küçük ölçekli deneylerin gerçekleşmesi. Bu yüzden yapılan çalışmalar sonucunda elde edilen veriler sınırlı limitde kalacaktır. Bu yöntemin avantajları olarak da hem hassas ölçümler gerçekleştirilebilecek örneğin merminin metal levhaya girdiği zamanki açısal değişimler gibi hem de bu sistemin ölçümleri boyutlarında dolayı X-Ray cihazıyla gerçekleştirilebilecektir. Bu alışma seramiklerin darbe ve penetrasyona karşı direncini incelemek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Yapılan alışma sonucunda silisyum karbre karşı atılan mermi hızı arttıķa, bu malzemenin darbeye karşı göstermiş olduğu kütle etkinliği

düşmektedir. Toplam penetrasyon miktarı 4 km/s'den büyük hızlar için ideal hidrolik penetrasyon miktarında biraz daha fazladır.

Borvik ve diğ. [26] AA7075-T651 alüminyum malzemenin çekme ve basma testleri uygulandıktan sonra gerileme-şekil değişimi verileri belirlenmiştir. Plakalara 20 mm çapında 197 gram kütlede sertleştirilmiş çelik malzemeden yapılmış o-give ve küt uçlu mermiler kullanılarak alaşımın balistik direnç özellikleri ortaya çıkarılmaya çalışılmıştır. T651 temper, alaşım hafifçe uzamış ve 505 nominal akma ve 570 nominal çekme gerilmelerinde yaşlandırılmış demektir. Bu malzemenin çekme özellikleri malzemenin kalınlığına bağlıdır. Küt mermi için kırılma ve konik şekil malzemenin arka kısmında meydana gelirken, o-give mermi için her iki tarafta da meydana gelmiştir. Bu farklı durumun oluşmasında bu uçların hasar modlarının farklı olmasında kaynaklanmaktadır.

Liden ve diğ. [27] uzun çubuk mermi ile açısız çelik plakaların etkileşimi esnasında mermi uzunluğu ve çapı, plaka kalınlığı, mermi hızı ve plaka hızının etkilerini incelemişlerdir. Yapılan çalışmalar sonucunda mermi ile plaka arasındaki etkileşim süresince mermi penetrasyon olduğu kanallarda sürekli bir şekilde hareket ederken hareketli plakaların duran plakalara göre daha uzundur ve en uzun süre plaka öne doğru hareket ederken gerçekleşir. Yani mermi ile plaka arasındaki etkileşim en çok plaka öne doğru hareket ederken gerçekleşir sonucunu çıkarabiliriz. Eğer plaka arkaya doğru hareket ediyorsa aradaki etkileşim uç kısmında hafif bir eğilme ve hafifçe dönme ve ilerleme meydana gelir. Bu durumda aradaki etkileşim malzeme kalınlığına bağlıdır. Plaka ileriye doğru hareket ediyorsa mermide önemli ölçüde deformasyon meydana gelir. Kırılma merminin negatif yönde ilerlemesi ile artar. Uzunluk-çap oranı ve mermi hızı mermi ile plaka arasındaki etkileşimi en az etkileyen faktörlerdir diyebiliriz.

Gupta ve diğ. [28] yumuşak karbonlu çelik, alüminyum ve RHA çelik malzemelerin farklı katmanlı yapılarının balistik darbe karşısındaki davranışlarını incelemişlerdir. Farklı çaplarda mermi ile atışlar gerçekleştirilmiştir. Katman kalınlığı, malzeme türü ve kalınlık gibi parametrelerin nasıl balistik performansını etkilediği üzerinde çalışmışlardır. Yapılan çalışma sonucunda iki katmanlı malzemeden oluşan yapı ile aynı kalınlığa sahip tek katmanlı yapıdan oluşan sistemin artık hızları kıyaslanabilir olduğunu söylemektedirler. Düşük karbonlu çeliklerde iki katmanlı bir yapıda eğer ön katman arka katmana göre daha ince ise mermi gömülmektedir. Fakat ön katman

arka katmana göre daha kalın ise 29 mm penetrasyon gerçekleşmektedir. Açısal değişim malzemenin kalınlığına ve malzeme sertliğine bağlı olarak değişmektedir.

Sherman ve diğ. [29] alüminyum malzemenin çevresinden sınırlandırılması ile oluşacak hasar mekanizmaları üzerinde çalışmışlardır. Alüminyum malzemeler çerçeve içerisine yerleştirilirse bu kenarlardan malzemeye basma kuvveti uygulayacaktır. Bu çalışmada 0.3 cal. NATO zırh delici mermi kullanılmıştır. Mermi konik uçlu sertleştirilmiş malzemedan yapılmıştır. Numunenin etraflarında hareket etmesinin engellenmesi sonucunda hasarın azaldığı, radial konik şeklinde oluşan kırılmaların azaldığı sonucu gözlemlenmiştir. Hasar mekanizması tabaka kalınlığı ile etkilenmektedir.

Özşahin ve diğ. [30] üç özel alüminyum alaşımlarının yüzeylerinin farklı iki farklı tipte spray ile yüzey kaplama tekniğinin kullanılarak balistik performansı incelenmiştir. 2024-T352, 6061-T651 ve 7075-T651 alüminyum alaşımlarının kaplamalı ve kaplamasız durumlardaki davranışları incelenmiştir. Yüzeyler Co-Mo-Zr ve ZrO_2 ile kaplanmıştır. Yapılan çalışma sonucunda AA7075-T651 en yüksek darbe direncini göstermiştir. AA6061-T651 ise en düşük dirence sahiptir. AA2024-T351 ise bu iki malzeme arasında bir direnç göstermiştir. Yüzeyleri kaplanan malzemelerin balistik performansı yüzeyi kaplamasız malzemelere göre daha iyidir. Bu sonuca göre yüzey kaplamasının malzemenin darbe direncini artırdığını söyleyebiliriz. ZrO_3 ile kaplanan yüzeyler Co-Mo-Cr ile kaplanan yüzeylere göre biraz daha direnç gösterdiği sonucuna ulaşılmıştır.

3.2 Nümerik Çalışmalar

Quan ve diğ. [31] Seramik ve cam malzemelerde meydana gelen hasar mekanizmaları için yaygın olarak kullanılan Johnson-Holmquist hasar modelini hem deneysel hemde teorik olarak çalışmalarını gerçekleştirmişlerdir. JH-1 hasar modelini çalışmalarında kullanmışlar ve silikon karbür malzemesi için deneysel ve analitik çalışma birbiriyle uyumlu sonuç vermiştir. Yapılan simülasyon çalışması silikon karbür seramik levha için kenarlarından sabitlenerek hareket etme imkanı engellenmiş ve mermi belli bir açı ile gönderilerek merminin çıkış hızı JH-1 modeli kullanılarak sonuçlar karşılaştırılmıştır. Bu sonuçlar karşılaştırıldığı seramik

malzemelerin hasar ve kırılmalarında kullanılan JH-1 malzeme modeli belli koşullarda doğru sonuçlar vermiştir.

Galanov ve diğ. [32] yarı sonlu bir hedef üzerine uzun asimetrik elastik deformasyona uğrayan bir merminin analitik ve numerik çalışmasını gerçekleştirmişlerdir. Deformasyona uğramayan bu mermi için diferansiyel-integral eşitliklerden yararlanmışlardır. Hem rijid hemde elastik mermi için penetrasyon hızı fonksiyona bağlıdır. Bu çalışmada alüminyum ve kireç taşına farklı hızlarda ve farklı mermi şekillerinde atışlar gerçekleştirilmiştir. Plastik malzemeler için iki farklı hedef malzemeye karşı statik penetrasyon direnci kullanılmıştır. Birinci tipi küresel boşluk şeklinde genişleyen analitik çözümdür. İkinci tip ise, hız gradyanların hesaba katılıp simetri parçaların gerilme farklarının tanımlandığı Tata tarafında tanımlanan selonit modelin kullanıldığı analitik yaklaşımdır. Teorik sonuçlar kıyaslandığı zaman çarpma hızının penetrasyon miktarına bağlı olarak değişimi birinci ifade de rijit mermi için hesaplandığı zaman deneysel sonuçlar teorik sonuçlardan daha düşük çıkmıştır. Bu çalışmada bazı yaklaşımlar hesaplanarak bu sapmalar düzeltilmiştir. Tata ifadesinde ise deneysel ve teorik çalışmalar uyumluluk göstermiştir.

Lee ve diğ. [33] uzun çubuk şeklindeki mermi ile metal/seramik/metal sistemden oluşan bir yapıya açısal olarak NET3D programıyla açısal atışlar gerçekleştirmişlerdir. Bu programda zamana bağlı olarak eksplisit zaman artışına bağla lagrange sonlu elemanlar methodunu kullanmışlardır. Açısal olarak gönderilen mermilerin penetrasyon miktarlarını ölçmüşler ve deneysel sonuçlar ile karşılaştırdıklarında başarılı sonuçlar bulmuşlardır. Alumina/alüminyum sisteminden oluşan yapıya zırh delici mermi ile 850 m/sn hızında atış gerçekleştirildiği zaman kalınlık oranı normal atış için 2.0 hesplanırken, 30° açı ile atış gerçekleştirilirse 1.0 hesaplanmıştır.

Iqbal ve diğ. [34] keskin uçlu merminin tek katlı ve katmanlı bir yapıdan oluşan sisteme açısal ve normal açıda atış simülasyonu gerçekleştirmişlerdir. Weldox 460 E ve 1100-H12 alüminyum malzemelerini konik ve o-give şeklindeki uca sahip çelik mermiler ile atışlar gerçekleştirmişlerdir. Weldox 460 E malzemesi tek katlı 12 mm uzunluğunda ve iki adet 6 mm kalınlığındaki iki katmanlı bir yapıdan oluşmaktadır. 1100-H12 malzemesi ise 1 mm kalınlığında tek katmandan ve 0.5 mm kalınlığında iki katmanlı yapıdan oluşmaktadır. Sisteme 0°, 15° ve 30° açılarında atışlar gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda aynı kalınlığa sahip tek katlı ve iki

katmandan oluşan yapıların balistik dayanımları karşılaştırıldığı zaman tek katmanlı yapının iki katmanlı yapıya göre daha fazla direnç gösterdiği sonucuna ulaşılmıştır. İki malzeme içinde sünek yapıda delik çevresinde genişleme oluşmuştur.

Flores ve diğ. [15] tek katmanlı, iki katmanlı, üç katmanlı ve alüminyum ve çelik birleşiminden oluşan bir sistemin balistik performans özelliklerini değerlendirmişlerdir. Atışlar 770-950 m/sn hızlarda 7.62 mm zırh delici mermi ile gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada aynı malzemeden oluşan bir sistemde aynı kalınlıkta tek katmanlı bir yapıdan oluşan sistemin iki katmanlı bir yapıya göre daha etkili balistik performans gösterdiği gözlemlenmiştir. Ayrıca aynı alansal yoğunluğa sahip ince alüminyum katman ve kalın çelik katmandan oluşan bir yapı iki katmanlı çelik bir yapıdan oluşan sisteme göre daha fazla direnç göstermiştir. Bu da farklı metalik malzemelerden oluşan sistemlerin ağırlık kazancı sağlayarak daha dayanıklı bir yapı oluşturabileceği anlamına gelebilir.

Zaera ve diğ. [35] seramik malzemelerin metal malzemeler ile birleştirilmesinin etkisini analitik ve deneysel olarak incelemişlerdir. Poliüretan (yumuşak yapıştırıcı) ve kauçuk-epoksi reçine (rijit yapıştırıcı) olmak üzere iki çeşit ve farklı kalınlıklarda yapıştırıcılar kullanılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda kalın yapıştırıcının uygulandığı sistemde destek plakasında daha fazla alanda plastik deformasyon meydana gelmiştir. Ayrıca yapıştırıcı kalın olduğu zaman seramik malzeme penetrasyonun ilk anlarından itibaren kırılmaya başlıyor. Bu da zırh sisteminin koruması için negatif etki yaratmaktadır. Fakat yapılan deneysel çalışmalarda ise bu yapıştırıcının kalın olması kırılan parçaların bir arada tutulmasını sağladığı görülmüştür.

Sharma [36] simülasyon yöntemiyle farklı hedeflerdeki darbe ve penetrasyon mekanizmalarını incelemiştir. İki farklı hedefe iki farklı mermi şeklini göndermiştir. İlk durumda, 32 mm kalınlığında tek katmandan oluşan sisteme 7 ile 15 mm çaplarında çelik toplar göndermiştir. İkinci sisteme 9.5 mm çapında tungsten alaşımından yapılmış küp şeklindeki mermi aralarında 100 mm mesafe bulunan 4 mm, 4 mm ve 10 mm'lik sisteme gönderilmiştir. Her iki durum içinde atışlar iki kademeli gaz tüfeği ile gerçekleştirilmiştir. Yapılan simülasyon çalışması sonucunda lagrange modülü ile elde edilen sonuç euler ve SPH modülüne göre daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Eğer mermi ikinci ile üçüncü plaka arasında 1700-2000 m/sn hızla geçiş yapıyorsa üçüncü plaka mermi tarafından delinip mermi çıkış yapıyor.

Fakat mermi üçüncü plakaya 1700 m/sn den daha yavaş hızla geliyorsa mermi üçüncü plakada penetrasyon olmadığı görülmüştür.

Huang ve diğ. [37] seramik zırhların balistik performanslarını incelemişlerdir. Bu çalışmada uzun çubuk penetrasyonunun darbe etkisiyle seramik kalınlığı ile destek plakasından çıkış yapan mermi hızının etkileşimi incelenmiştir. Buna ilaveten diferansiyel etkinlik faktörü ile seramik kalınlığı arasında yeni bir ifade üzerinde çalışmışlardır. Bu DEF mermi ile yüzey arasındaki etkileşimi incelediği için mermi kafası ile seramik kalınlığının etkisi göz ardı edilebilir. Bu çalışmada önerilen diferansiye etkinlik faktörü seramik zırhların değerlendirilmesinde kullanılabilir. Ayrıca ağır seramik metal kompozisyonlarında da kullanmak mümkündür.

3.3 Analitik Çalışmalar

3.3.1 Florence modeli ve analitik tasarım kriteri

3.3.1.1 Florence modeli

Bu model de sert ön seramik ön plaka ve sünek destek plakadan oluşan bir sisteme rijit bir merminin çarptığı düşünülerek hesaplamalar gerçekleştirilir. Balistik hız limitini mermi penetrasyonundan korunmak için koruyucu zırhın darbeye karşı ölçülen hız limitini dikkate alır. Bu model ikili sistemlerden oluşan zırh korumalarında deneysel yöntemler ile kıyaslandığı zaman iyi sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir [38].

Sert seramik ön plaka ve sünek destek plakasından oluşan ikili bir sisteme rijit bir mermi ile çarpmanın gerçekleştiği düşünülebilir. Florence modeli aşağıdaki şekilde tanımlanabilir;

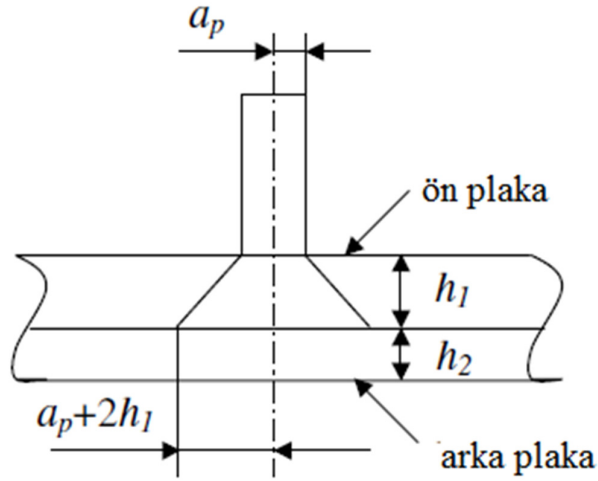
$$V_p = \sqrt{\frac{\alpha \varepsilon_2 \sigma_2 h_2}{0.91 m_p f(a)}} \quad (3.1)$$

$$f(a) = \frac{m_p}{[m_p + (\rho_1 h_1 + \rho_2 h_2) \pi a^2] \pi a^2} \quad (3.2)$$

$$a = a_p + 2h_1 \quad (3.3)$$

Sırasıyla bu katsayılar V_p tahmini balistik hız limiti, α denklemler ile belirlenen katsayı, ε_2 ve σ_2 kopma uzaması ve maksimum çekme dayanımı, ρ_2 ve h_2 yoğunluk ve arka destek plakanın kalınlığı, ρ_1 ve h_1 yoğunluk ve ön plakanın kalınlığı, m_p ve a_p kütle ve mermi yarı çapıdır. $\alpha=1$ olduğu zaman yukarıda Florence modeli işin içine girer. Şekil 3.1’de Florence modelinin tasarımını görebiliriz [38].

Bu modelde ideal kısa silindir çubuk mermi seramik malzemeye normal açıda çarpıyor ve bu çarpmanın etkisiyle seramikte konik şekilde kırılmaya neden oluyor ve bu ilerlemeye devam ediyor. Bu darbe şeklinde yayılır ve bu alan mermi çapını geçtiği zaman destek plakasına enerjiyi aktarır. Akabinde sünek malzeme zar şeklinde deforme olur [38].



Şekil 3.1 : Florence Model [38].

3.3.1.2 Analitik tasarım kriteri

Florence modele bağlı olarak Hetherington ön plaka ve arka plaka arasındaki optimum kalınlığı bulmak için bazı çalışmalar gerçekleştirmiştir. Bu modelde zırhın toplam kalınlığı önceden belirtilmez [38].

$$\frac{h_1}{h_2} = \frac{\rho_2(a - a_p)}{2A - \rho_2(a - a_p)} \quad (3.4)$$

a değeri ise aşağıdaki ifadeden elde edilir;

$$(5\pi\rho_1 A)a^3 - 4\pi A(2A + \rho_1 a_p)a^2 + 3m_p \rho_1 \alpha - 2m_p(2A + \rho_1 a_p) = 0 \quad (3.5)$$

Wang ve Lu isminde iki araştırmada bu modelden farklı olarak zırh sisteminin kalınlığını önceden belirlenen bir kriter ortaya koymuşlardır. Ön ve arka plakanın optimum tasarım kriteri aşağıdaki şekildedir;

$$\frac{h_1}{h_2} = \frac{a - a_p}{2T - (a - a_p)} \quad (3.6)$$

T ise önceden belirlenmiş toplam zırh kalınlığıdır. a ise aşağıdaki ifadeden elde edilmiş bir parametredir.

$$\begin{aligned} & 3(\rho_1 - \rho_2)\pi a^4 - 5\pi[(\rho_1 - \rho_2)a_p + (2\rho_2 - \rho_1)T]a^3 \\ & - 2\pi[4T^2\rho_2 + 4(\rho_1 - 2\rho_2)Ta_p + (\rho_1 - \rho_2)a_p^2]a^2 \\ & + 3m_p a - 2m_p(2T + a_p) = 0 \end{aligned} \quad (3.7)$$

4. ZIRH TASARIMINA ETKİ EDEN FAKTÖRLER

Zırh kullanılmaya başlandığı ilk dönemlerde ağır malzemelerden yapılmaktaydı. Bu da personel açısından ağırlık ve daha çabuk yorulma anlamına gelmekteydi. Teknolojinin gelişmesiyle birlikte bu alanda yapılan çalışmalarda, mermi penetrasyonunu derine nüfuz etmeden durdurmak için daha sert ve daha hafif malzeme sistemlerinden oluşan zırhlar üzerinde çalışılmıştır. Tabi bu seçimi yaparken parametlerin nasıl etki ettiği de önem taşımaktadır. Bu bölümde bu parametlerin nasıl etki ettiğini incelemeye çalışacağız.

4.1. Mermi Geometrisinin Etkisi

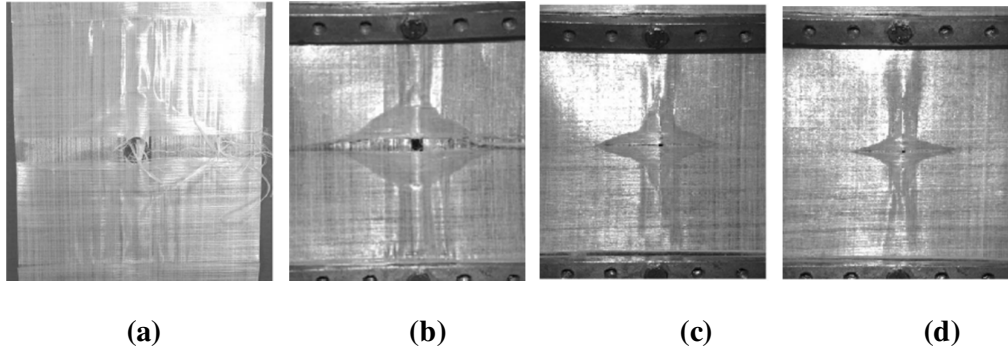
Tan ve Khoo [40] farklı mermi geometrilerinde atışlar gerçekleştirmişler ve mermi geometrisinin malzeme üzerindeki etkisini incelemeyi amaçlamışlardır. Bu çalışmalarında düz uçlu, yarı küresel, sivri ve konik uçlardan oluşan mermi ve Spectra® levha kullanmışlardır. Kullanılan deney numunesi iki termoplastik filmde oluşan polietilen zincirlerdir. Şekil 4.1’de farklı geometrilerdeki mermi çeşitlerini görmekteyiz.



Şekil 4.1: Kullanılan mermi geometrileri [40].

Çalışma sonucunda düz uçlu mermi ile yapılan atış sonucunda numunede penetrasyon sonucunda piramit şeklinde deforme olmuştur. Bu mermi tabakaya

kesme kuvveti etkisiyle delik açmıştır. Yarı küresel mermi de düz uçlu mermi ile benzer özellikler göstermiştir. Düz uçlu mermi de delme sonrası numune de mermi çapında delik açılırken yarı küresel uçda mermi çapından daha küçük boyut da delik açılmıştır. Bunun sebebi olarak da tabakada düz uçlu mermi daha çok gerilme meydana getirmesi olarak belirtilmiştir. Konik ve küresel mermilerde düz ve yarı küresel uçlu mermilerden çok farklı bir şekilde etki göstermişlerdir. Bu mermilerde ise çok küçük bir delik açılarak delme gerçekleşmiştir. Şekil 4.2 de farklı mermi uçlarının oluşturduğu delinme şeklini görmekteyiz.



Şekil 4.2 : a) Düz uçlu mermi, b) Yarı küresel mermi, c) Konik mermi, d) Sivri uçlu mermi [40].

4.2. Kalınlık

Kalınlığın artması zırh sistemi için daha güvenilir sonuçlar vermektedir. Fakat kalınlığın artması aynı zamanda ağırlık artmasına da sebep olacağı unutulmamalıdır. Bu yüzden de optimum bir kalınlık belirlenmeye çalışılmalıdır.

4.3. Eğiklik Etkisi

Fawaz ve diğ. [2] normal ve açılal şartlarda gelen mermi şartlarını incelemişlerdir. Çalışma sonucunda kinetik enerji, iç enerji ve toplam enerjinin zamana bağlı değişimi iki durum içinde benzerlik gösterirken, seramik ve kompozit arasında meydana gelen gerilme ve açılal gelen mermi ile seramik yüzey arasında oluşan kuvvet açılal durum için dik duruma göre daha küçük olduğunu gözlemlemişlerdir.

4.4. Yapıştırıcı

Lopez-Puente ve diğ. [41] alümina/alüminyum arasındaki yapıştırıcı kalınlığının etkisini incelemişlerdir. Bu çalışmada 3 sonuca varmışlardır. Bunlar, kalın tabakalarda ince katman şeklinde kullanılan yapıştırıcıdaki kesme kuvveti düşmekte, bu sebeple oluşan hasarı önlemekte ve çarpma sonucunda destek plakasına yapıştırılan seramik levhayı tutarak levhanın dağılmasını önlemektedir. Seramik ile metal arasındaki yük iletimini sağlayarak destek plakasının enerji absorbe etmesine olanak sağlamaktadır. Sert tabakanın eğilmesini önlemektedir.

Zaera ve diğ. [35] yapıştırıcı kalınlığının etkisi üzerinde çalışmışlardır. Bu çalışmada kalın yapıştırıcı tasarlandığı zaman destek plakasında daha geniş bir alanda plastik deformasyona neden olduğu sonucuna varmışlardır. Bu her ne kadar enerji absorbe etmeye yardımcı olsa da kalın yapıştırıcı kullanıldığı zaman ön plakanın daha kolay kırılıp parçalandığı görülmüştür. Parçalanmayı geciktirmek için daha ince bir katmanlı yapıştırıcı tercih edilmelidir.

4.5. Malzeme Safılığı ve Tane Boyutu

Gonçalves ve diğ. [12] seramik malzemenin tane büyüklüğünün zırh sistemi üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Yapılan deneysel çalışma sonucunda tane boyutunun balistik darbe enerjisini sönmlemede önemli etkisi olduğu sonucuna varmışlardır. Küçük tane yapısına sahip malzemeler büyük taneli malzemelere göre daha fazla dayanım göstermiştir. Çalışma tamamlandığında levha kalınlığı sabit kalacak şekilde tane yapısının iyileştirilmesiyle daha dirençli malzeme elde edilebileceğini söylemişlerdir.

Gözenekli yapılar malzeme dayanımı üzerinde önemli etkisi vardır. Saf malzemeler gözenekli malzemelere göre daha yüksek dayanım gösterirler. Çünkü çarpma etkisi esnasında bu dislokasyon hareketi malzeme dayanımını düşürmektedir. Daha sağlam bir yapı elde edilmesi için mümkün olduğunca saf malzeme kullanılmaya çalışılmalıdır.

4.6. Tokluk ve Sertlik

Balistik darbe esnasında, seramik veya elik gibi malzemelerde plastik deformasyon meydana gelir. Bu yüzden de bu malzemelerin mekanik özellikleri zırh sistemini doğrudan etkilemektedir. Eğer balistik darbe dayanımına karşı sistemin dirençli olmasını istiyorsak, tokluk, sertlik ve dayanım gibi mekanik özelliklerinin yüksek olması, sisteminde balistik performansının iyi olması anlamına gelmektedir.

Tokluk malzemelerin kırılma karşısındaki enerji absorbe etme özelliği olarak bilinir. Zırh tasarımında önemli olan etkenlerden birisi de darbe karşısında sistemin merminin enerjisini absorbe etmek koşuluyla mermiyi durdurmaktır.

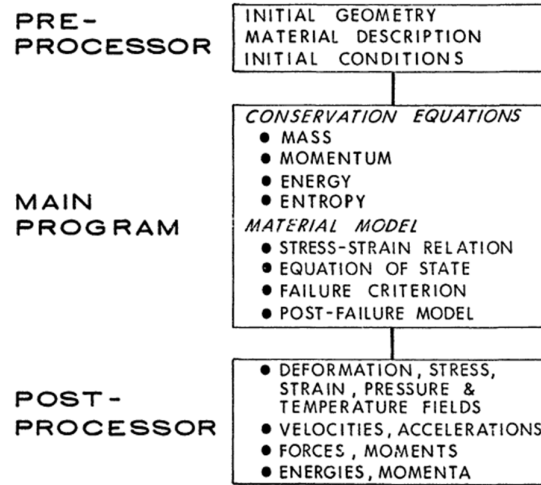
Demir ve diğ [42] sertliğin balistik davranış karşısındaki durumunu incelemişlerdir. alışmalarında iki farklı malzeme ve dört farklı ısıl işlem durumunu incelemişlerdir. Sonuç olarak sertliği yüksek olan malzemenin mermiyi durdurmada daha etkili olduğu sonucuna varmışlardır.

5. DARBE OLAYLARININ NÜMERİK SİMÜLASYONU

5.1. Genel Bilgiler

Analitik modeller, darbe olayları için meydana gelen fiziksel olaylar için oldukça kullanışlıdır. Alınan sonuçlara göre hangi faktörlerin etkili olduğunu anlama konusunda çalışmalarda yardımcı olur. Eğer bir darbe olayı için kesin bir sonuç gerekecekse, genellikle nümerik çözümlerle gerçekleştirilir. Kompleks geometrilerin ve yükleme şartlarının belirlenmesinde iki boyutlu veya üç boyutlu bilgisayar kodlarının faydası vardır. Ancak, bünye denklemlerini kullanarak malzeme modellerinin sınırlı olması nedeniyle hassasiyetleri ve kullanımı sınırlıdır. Malzeme davranışlarının iyi bir şekilde yorumlandığı ve karakterize edildiği durumlar için mükemmel sonuçlar elde edilebilir.

Hesaplama prosesi için tanımlamalar Şekil 5.1’de gösterilmiştir. Tek bir bilgisayar programı veya kodu için üç aşamada tanımlanmıştır. Bunlardan ilk aşaması ön işlem olarak bilinen geometrinin tanımlanması, malzeme tanımlaması ve başlangıç koşullarının belirlenmesidir. Bu bölümde asıl amaç bir sonraki bölümlerde gerekli olan bilgileri elde etmek için gerekli başlangıç çalışmasını yapmaktır.



Şekil 5.1: Darbe simülasyonları için hesaplama prosesleri [43].

İkinci aşamada ise kütle, momentum ve enerji korunumu, basınçların belirlenmesi için bünye denklemleri, hasar kriterleri ve bir önceki aşamadaki belirlenen koşullar kullanılarak ana programın belirlenmesi amaçlanır. Fakat bu aşama zaman alıcı bir süreç gerektirir. Fazla depolama alanı, uzun bir çözüm zamanı ve birkaç durum dışında ilk defa da sonuca ulaşmak zordur.

Hesaplama veya çıktı sonuçları genellikle çok büyüktür. Kodlar zamanın fonksiyonu olarak problem boyunca malzeme koşullarını ve fiziksel büyüklüklerin tanımlamalarını üretir. Çıktılar listelendiği zaman iki veya üç boyutlu analizlerin sonuçları yüzlerce sayfayı bulmaktadır. Bu yüzden okumak imkansızdır. Bunun içinde son işlemci denilen üçüncü aşama vardır.

Üçüncü aşamada deformasyon, hız, sıcaklık, enerji alanlarının verilen zamanda sonuçlarını göstermek için grafikler oluşturulur.

5.2. Sonlu Elemanlar Yöntemi

5.2.1. Darbe dinamiği ve explicit method

Explicit yöntem zamana bağlı olarak değişimi ifade eder. Explicit yöntemlerden en yaygın kullanımı central difference yöntemidir. Bu yöntem hız ve ivme için central difference formüllerinden türetilmiştir. Geometri ve malzeme nonlinieritesini kapsar ve zaman etkisini de içerir [44].

Bu yöntemde şu notifikasyonları kullanacağız. Simülasyon zamanını $0 \leq t \leq t_e$ olacak şekilde zaman aralığına, Δt^n , $n:1$ 'den n_{TS} 'ye kadar değişecek (n_{TS} zaman adım miktarını temsil ediyor) ve t_e simülasyonun bitiş zamanı olacak şekilde alt başlıklara bölelim. $N:0$ için $t^0=0$ olacak ve bu simülasyonun başlangıç değeridir ve $d^n \equiv d(t^n)$ olarak yazılır ve bunun anlamı da n zaman aralığındaki nodal yerdeğişimin matriksi olarak ifade edilir. Zaman artışı n ;

$$\Delta t^n = t^n - t^{n-1} \quad (5.2)$$

denklemini ile ifade edilir. Zaman aralığının orta noktası ise aşağıdaki denklem ile ifade edilir.

$$\Delta t^{n+\frac{1}{2}} = \frac{1}{2}(\Delta t^n + \Delta t^{n+1}) \quad (5.2)$$

Hız için merkezi fark yöntemi;

$$\dot{d}^{n+\frac{1}{2}} \equiv v^{n+\frac{1}{2}} = \frac{1}{\Delta t^{n+\frac{1}{2}}} (d^{n+1} - d^n) \quad (5.3)$$

yukarıdaki denklemde düzenleme yaparsak, n+1 anındaki hız;

$$d^{n+1} = d^n + \Delta t^{n+\frac{1}{2}} * v^{n+\frac{1}{2}} \quad (5.4)$$

elde edilir.

İvme ifadesini hızını türevini alarak bulabiliriz. İvme;

$$\ddot{d}^n \equiv a^n = \frac{1}{\Delta t^n} \left(v^{n+\frac{1}{2}} - v^{n-\frac{1}{2}} \right) \quad (5.5)$$

ifadesini elde ederiz. Bu ifadeyi de düzenlersek;

$$v^{n+\frac{1}{2}} = v^{n-\frac{1}{2}} + \Delta t^n * a^n \quad (5.6)$$

ifadesine ulaşırız.

İvme ifadesini yer değiştirme ifadesinden elde etmek istersek, 5.5 ve 5.6 ifadelerinde yararlanarak bulabiliriz.

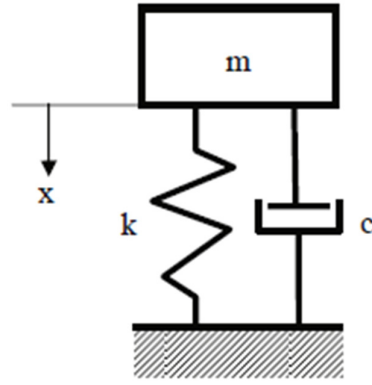
$$\ddot{d}^n = a^n = \frac{\Delta t^{n-\frac{1}{2}} * (\dot{d}^{n+1} - d^n) - \Delta t^{n+\frac{1}{2}} * (d^n - d^{n-1})}{\Delta t^n * \Delta t^{n-\frac{1}{2}} * \Delta t^{n+\frac{1}{2}}} \quad (5.7)$$

Zaman aralıklarının eşit olması durumu için yukarıdaki ifadeyi sadeleştirerek 5.8 nolu denklemi elde ederiz.

$$\ddot{d}^n \equiv a^n = \frac{(\dot{d}^{n+1} - 2 * d^n + d^{n-1})}{(\Delta t^n)^2} \quad (5.8)$$

Darbe problemlerinde çözüme ulaşmak için modellenen yapıların quasi-statik şekilde davrandığını ve yay şeklinde modellendiğini düşünerek problemleri biraz daha basite indirgeyebiliriz. Burada darbe hızı, çarpan cismin kütlesi ve merminin rijitlik katsayısı bize hesaplamalarda yol gösterici olabilir. Genellikle mermi ağırlığı, malzemenin kütlesi, iç sönümleme ve darbe hasarı genellikle gözardı edilir.

Lineer elastik bir yapıya kütlesi m olan bir mermi darbe ile çarptığı zaman quasi statik olarak yapının deforme olduğunu düşünelim. Bu noktada darbe, yapıdaki yer değişimini belirlemek için rijitlik katsayısı k olan bir yay gibi modellenebilir. Tek serbestlik dereceli yay gibi modellenen sistemin kütle-sönümleme yay modeli için aşağıdaki ifadeyi yazabiliriz. Şekil 5.2’de modeli görmekteyiz.



Şekil 5.2: Sönümleme ile tek serbestlik dereceli model [45].

$$m \cdot \ddot{x} + c \cdot \dot{x} + k \cdot x = F(t) \quad (5.9)$$

Burada;

m : kütle,

c : sönümleme katsayısı,

k : yay sabiti

Her iki tarafı kütleyle bölüp ifadeyi tekrar yazarsak;

$$\ddot{x} + \frac{c}{m} \cdot \dot{x} + \frac{k}{m} \cdot x = \frac{F(t)}{m} \quad (5.10)$$

denklemini elde edilir. Doğal frekans ;

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (5.11)$$

ve sönümleme faktörü;

$$\xi = \frac{c}{(2 * \sqrt{m * k})} \quad (5.12)$$

$$f(t) = \frac{F(t)}{m} \quad (5.13)$$

olduğunu biliyoruz. 5.10 nolu denklemde 5.11, 5.12 ve 5.13 nolu ifadeleri yazıp tekrar düzenlersek;

$$\ddot{x} + 2 * \xi * \omega * \dot{x} + \omega^2 * x = f(t) \quad (5.14)$$

ifadesini elde ederiz [46].

5.2.2. Nümerik analiz

Bu çalışmada non-linear analiz programı olan AUTODYNA programı kullanılmıştır. Lagrange çözücü ile analizler gerçekleştirilmiştir. Burada her bir nod için ivme, hız, pozisyon ve momentum denklemlerini kullanarak hesaplamalar gerçekleşir. Son çevrime kadar hesaplanan iç bölgelerden kuvvet ile sınır ve etkileşim kuvvetlerini hesaplanmasıyla başlar. Bu değerler etkilenen bölgeleri ve şekil değiştirme oranını belirler. Son olarak malzeme modellerinden ve enerji denklemlerinden faydalanılarak bir sonraki çevrim için kullanılan enerji, gerilme ve basınç ifadelerini verir.

Nümerik analiz çalışmalarında sistem aşağıdaki başlıklar altında incelenebilir.

- Enerjinin korunumu,
- Kütlenin korunumu,
- Momentumun korunumu,
- Malzeme modelleri,
- Başlangıç koşulları,

- Sınır koşulları,

5.2.2.1. Kütlenin korunumu

Lagrange çözücü ile işlem yapıldığı zaman, malzeme herhangi bir deformasyon anında nodlar bulundukları bölgede kalırlar. Bu yüzden lagrange nodlar hareket eder ve çarpılmalar oluşur. Ve kütle korunumu otomatik olarak hesaplanır. Herhangi bir andaki yoğunluk başlangıç kütlesi ve o andaki hacim ile hesaplanır [46].

$$\rho = \frac{\rho_0 * V_0}{V} = \frac{m}{V} \quad (5.15)$$

ρ_0 : başlangıç anındaki yoğunluk,

V_0 : başlangıç anındaki hacim

ρ : herhangi bir andaki yoğunluk,

V : herhangi bir andaki hacim,

5.2.2.2. Momentumun korunumu

Newton'un ikinci yasası momentumun korunumunu kriterini basit olarak tanımlar. Hareketi linear ve açısal olarak iki bölüme ayırabiliriz.

Linear hareketin zamana bağlı değişimi:

$$I(t) = \int_V \rho * V * dV \quad (5.16)$$

veya açısal momentum;

$$D(t) = \int_V ({}^0X \otimes \rho * V) d^0 * V \quad (5.17)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho * V * dV = \int_S f * dS + \int_V \rho * b * dV \quad (5.18)$$

Burada ifade edilen f kuvveti kısmi yüzey elementlerinin davranışdır ve b kısmi hacimlerdeki bünye kuvvetidir.

$$\int_{tV} \left\{ \frac{\partial \rho V}{\partial t} + \frac{\partial \rho V}{\partial^t x} * V - \frac{\partial \sigma}{\partial^t x} - \rho * b \right\} * d^t * V = 0 \quad (5.19)$$

Lineer momentum korunması malzeme tanımlamasını bulmak için, başlangıç koşullarını hesaba katarak 5.19 nolu ifade formüle edilecektir. Malzeme tanımlaması için bünye kuvveti B;

$$B = b * \frac{d^t V}{d^0 V} = b * J \quad (5.20)$$

Kısmi korunum yasası;

$$\frac{\partial \rho V}{\partial t} + \frac{\partial \rho V}{\partial^t x} * V - \frac{\partial \rho V}{\partial^t x} - \rho * b = 0 \quad (5.21)$$

Açısal momentum ifadesini kullanarak momentum korunumunu çözmeye çalışırsak, sonucu dengede tutmak için herhangi bir referans noktasına göre herhangi bir andaki değişim integral euler formu ile ifade edilir;

$$\int_{tV} \left\{ \epsilon_{ijk}^t * x_j \left(\rho * \frac{\partial V_j}{\partial t} - \frac{\partial \sigma_{jk}}{\partial^t x_j} * \rho * f_j \right) \right\} + \epsilon_{ijk} * \sigma_{jk} * d^t V = 0 \quad (5.22)$$

Kısmi korunum formülü aşağıdaki gösterildiği gibi elde edilir;

$$\epsilon_{ijk} * x_j \left(\frac{\partial \rho V}{\partial t} + \frac{\partial \rho V}{\partial^t x} * V - \frac{\partial \sigma_{jk}}{\partial x_j} - b_j \right) + \epsilon_{ijk} * \sigma_{jk} = 0 \quad (5.23)$$

5.21 nolu ifade ile 5.23 nolu ifadeyi düzenlersek, aşağıdaki eşitliği elde ederiz;

$$\epsilon_{ijk} * \sigma_{jk} = 0 \quad (5.24)$$

$$(\sigma_{23} - \sigma_{32}) + (\sigma_{31} - \sigma_{13}) + (\sigma_{21} - \sigma_{12}) = 0 \quad (5.25)$$

Bu ifadelerden de;

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ji} \quad (5.26)$$

sonucunu elde ederiz.

5.2.2.3. Enerjinin korunumu

Basınç, enerji ve yoğunluğun bir fonksiyonudur. Bunu aşağıdaki şekilde gösterebiliriz [46];

$$p = f(p, e) \quad (5.27)$$

$$\dot{e} = \frac{1}{\rho} \left(\sigma_{xx} \dot{\epsilon}_{xx} + \sigma_{yy} \dot{\epsilon}_{yy} + \sigma_{zz} \dot{\epsilon}_{zz} + 2 \sigma_{xy} \dot{\epsilon}_{xy} + 2 \sigma_{xz} \dot{\epsilon}_{xz} + 2 \sigma_{yz} \dot{\epsilon}_{yz} \right) \quad (5.28)$$

5.2.3. Malzeme modelleme

Yüksek hızda çarpma olaylarında malzemelerin deformasyonunu gerilme tensörü ve hidrostatik basınç davranışı olarak ikiye ayırabiliriz Metal malzemeler kesme gerilmelerinde plastik akmaya maruz kalırlar. Bu olay basınçtan bağımsız olarak gerçekleşir ve volumetrik davranış olay kesme olaylarından bağımsız olarak meydana gelir.

Hidrostatik basınç olayı basınç, hacim ve iç enerji ve sıcaklık gibi bazı termal parametrelerinden oluşan ifadeler ile tanımlanır. Hidrostatik basınç ifadesini bünye denklemlerini kullanarak bulabiliriz.

5.2.3.1. Linear bünye denklemleri

Linear eşitlik ifadesinde basit olarak izotermal olayları ($dT=0$) gözardı ederek basınç-hacim veya basınç-yoğunluk arasındaki ilişkilerden bulabiliriz.

Hacim modülünü kullanarak;

$$K = -V \left(\frac{\partial P}{\partial V} \right)_s = P \cdot c^2 \quad (5.29)$$

Linear eşitlik durumu 5.29 nolu ifade de kullanılarak aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$\rho = K \cdot \epsilon_{kk} = K \cdot \frac{P - P_0}{P_0} = K \cdot \left(\frac{P}{P_0} - 1 \right) = k \cdot \mu \quad (5.30)$$

Basınç ifadesi μ hacim ve yoğunlukda meydana gelen değişim oranı olarak tanımlanır.

$$\mu = -\frac{\Delta V}{V} = \frac{P}{P_0} - 1 \quad (5.31)$$

İzotropik malzemeler için ise bu ifadeyi hacim modülü K, Young modülü E, poisson oranı μ ifadesinden yararlanılarak kesme modülü G arasındaki ilişkiden bulabiliriz.

$$K = \frac{E}{3 \cdot (1 - 2 \cdot \mu)} = \frac{2 \cdot G \cdot (1 + \mu)}{3 \cdot (1 - 2 \cdot \mu)} \quad (5.32)$$

Yukarıdaki ifade küçük basınç ifadelerinde kullanılabilir. Büyük basınç ve şok yüklemelerinde kullanılamaz.

5.2.3.2. Nonlinear bünye denklemleri

Linear eşitlikleri her zaman kullanmamız mümkün değildir. Geniş kapsamlı bir basınç ve enerji durumlarında nonlinear ilişkilere ihtiyacımız vardır. Nonlinear ifadenin polinomal ifadesi aşağıdaki gibi ifade edilir;

$$P = K_1 \cdot \mu + K_2 \cdot \mu^2 + K_3 \cdot \mu^3 + (B_0 + B_1 \cdot \mu) \cdot \rho_0 \cdot e \quad (5.33)$$

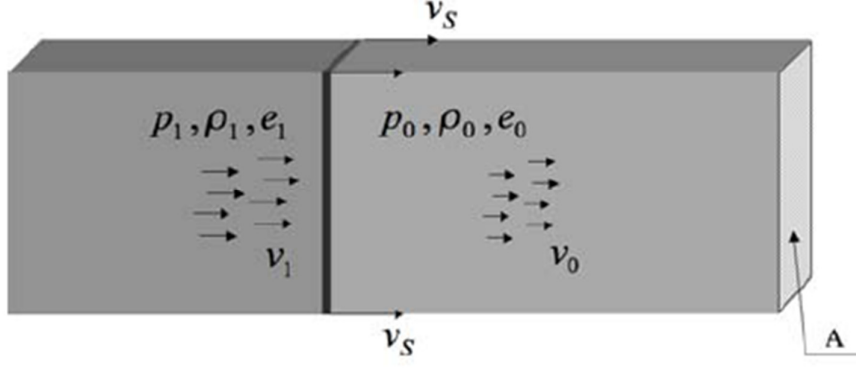
Burada kullanılan K_i ifadesi sıkıştırma sabiti ve B_i ifadesi genişleme sabiti olarak kullanılır.

5.2.3.3 Şok bünye denklemleri

Linear bünye denklemleriyle belirlenemeyen büyük basınçlı ve şok yüklemeleriyle oluşan ifadeleri şok bünye denklemleriyle ifade ederiz.

Reimann şok dalgalarındaki değişkenleri incelemek için kesit alanı A olan bir tüp içerisinden dalga gönderiyor. Bu çalışmada incelenen parametreler yoğunluk (ρ), basınç (p), iç enerji ϵ ve ses hızıdır (c). Şok yayılma hızı ise v_s ile gösterilecektir [47].

Hugoniot eğrilerine göre dalga hızını parçacık hızı ve deneysel yolla elde edilmiş eğrilerin eğiminden bularak elde edebiliriz. Şekil 5.3 bize şok dalga hesaplama örnek modelini göstermektedir.



Şekil 5.3: Şok dalgalarının önünde ve arkasındaki değişkenlerinin belirlenmesi için değişkenlerin durumu [47].

$$v_s = c_0 + S * v_1 \quad (5.34)$$

Mie-Grüneisen şok ifadesini aşağıdaki şekilde ifade edebiliriz;

$$p(V, e) = p_H - \frac{\Gamma(V)}{V} * (e - e_H) \quad (5.35)$$

Burada, p_H ve e_H ifadeleri Hugoniot durumlarını ifade ediyor.

$$p_H = p_0 + \rho_0 * c_0^2 * \frac{\eta}{(1 - S * \eta)^2} \quad (5.36)$$

$$e_H = e_0 + \frac{\eta}{\rho_0} * p_H - \frac{\eta^2}{2} * \frac{c_0^2}{(1 - 2 * \eta)^2} \quad (5.37)$$

$$\eta = 1 - \frac{\rho_0}{\rho} \quad (5.38)$$

5.2.4. Dayanım

Dayanım modeli için örneği şekil 5.4'te görebiliriz. Von-Mises dayanımı basınç, şekil değişim oranı ve hasara bağlıdır. Hasar görmemiş malzemelerde $D=0$, kısmi hasar gören malzemelerde $0 < D < 1$ ve tamamen hasar gören malzemelerde $D=1$ 'dir. Şekil değişim hızı $\varepsilon = 1.0$ ise dayanım σ , basınç $p = p_i$ ve maksimum hidrostatik gerilemedir. Eğer basınç (p) değeri p_i değerinden büyük ise analitiksel gösterimi aşağıdaki gibidir [48].

$$\sigma = \sigma_i + (\sigma_{\max} - \sigma_i) * \{1.0 - \exp[-\alpha_i * (p - p_i)]\} \quad (5.39)$$

Buradan;

$$\alpha_i = \frac{\sigma_i}{[(\sigma_{\max} - \sigma_i) * (p_i + T)]} \quad (5.40)$$

Herhangi bir f anında ise eğer basınç p_f değerinden büyük ise dayanım ifadesi;

$$\sigma = \sigma_f + (\sigma_{\max}^f - \sigma_f) * \{1.0 - \exp[-\alpha_f * (p - p_f)]\} \quad (5.41)$$

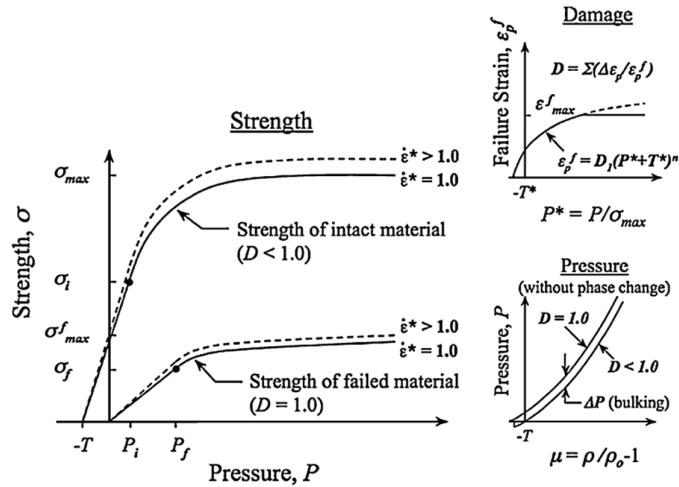
Buradan da;

$$\alpha_f = \frac{\sigma_f}{[p_f * (\sigma_{\max}^f - \sigma_f)]} \quad (5.42)$$

C boyutsuz şekil değişim sabiti olmak üzere, sağlam ve hasar görmüş malzemelere ait 5.39, 5.40, 5.41 ve 5.42 nolu ifadeleri kullanarak;

$$\sigma = \sigma_0 * (1.0 + C * \ln \dot{\epsilon}^*) \quad (5.43)$$

eşitliğini elde ederiz.



Şekil 5.4: Faz değişimi meydana gelmeden JHB seramik model [48].

5.2.5. Hasar

Hasar ifadesi aşağıdaki şekilde analitik olarak gösterebiliriz.

$$D = \sum \frac{\Delta \varepsilon_p}{\varepsilon_p} \quad (5.44)$$

Burada güncel çevrim iterasyonu süresince plastik şekil değişimindeki artış miktarı $\Delta \varepsilon_p$ ve mevcut basınç altında kırılmaya neden olan plastik şekil değişimi ε_p^f 'dir [48].

Kırılma şekil değişiminin genel ifadesi;

$$\varepsilon_p^f = D_1 * (P^* + T^*)^n \quad (5.45)$$

Burada D_1 ve n boyutsuz sabitler olup $T^* = T / \sigma_{\max}$ dur [48].

5.2.6. Malzemelerde modellerinin nümerik incelenmesi

5.2.6.1. Seramik zırhlar için Johnson-Holmquist (JH) dayanım modeli

Seramik malzemeler düşük yoğunlukları ve yüksek sertlikleri nedeniyle zırh malzemesi olarak yaygın kullanıma sahiptir [49].

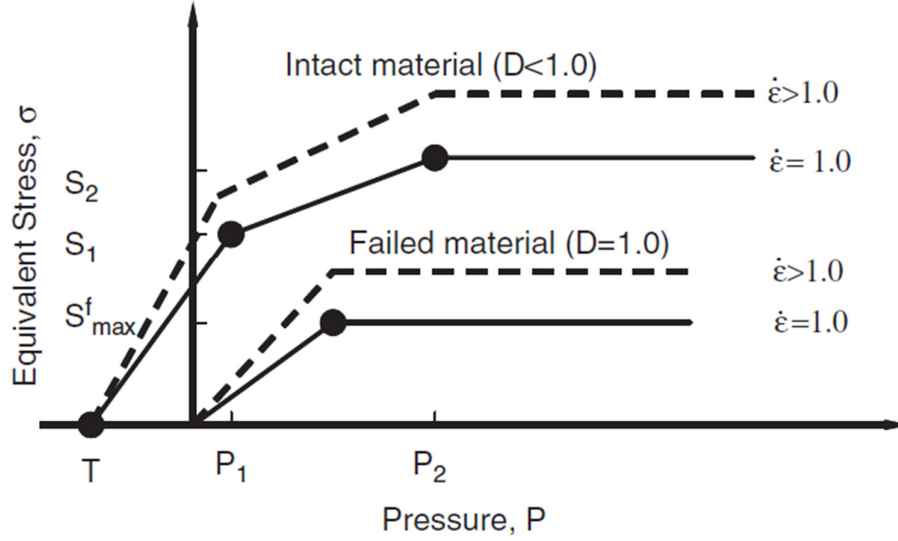
Seramik malzemeler kırılğan bir yapıya sahiptirler. Gerilme dayanımları zayıf, basma dayanımları yüksektir. Bu yüzden de hasara uğradıkları zaman hacimsel değişim gösterirler [50].

$$\sigma = \sigma_0 * (1.0 + C * \ln \dot{\varepsilon}) \quad (5.46)$$

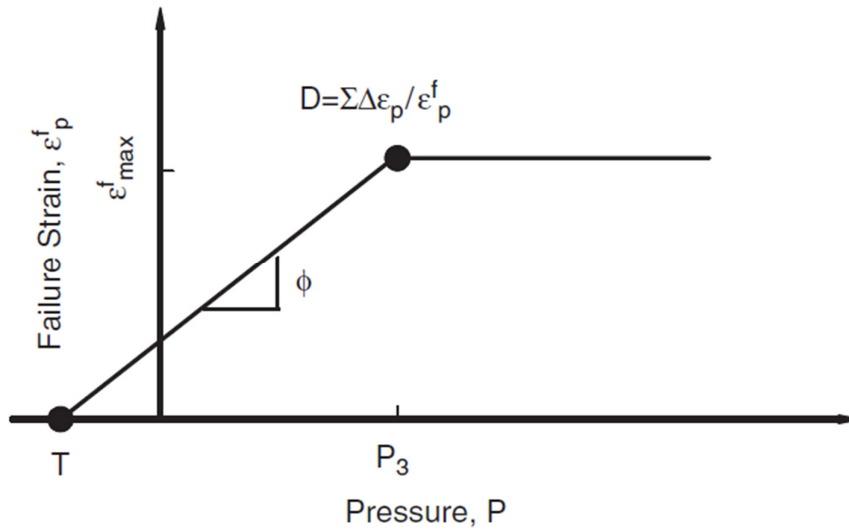
Burada $\dot{\varepsilon}$ şekil değişimi, σ eşdeğer akış dayanımını, $\sigma_0 * \dot{\varepsilon} = 1.0$ anındaki mevcut dayanımı ve C ise şekil değişim oranı sabitini ifade eder [51].

Şekil 5.5, şekil 5.6 ve şekil 5.7'de JH-1 modelin şematik gösterilmei mevcuttur. Malzeme dayanımı eşdeğer gerilme ve basınç lineer eğri olarak tanımlanmıştır. Verilen basınç altında şekil değişim oranını artması eşdeğer gerilmeyi de artırır ve bunun sonucunda malzeme dayanımı artar. Tam tersini düşünürsek verilen basınç altında malzeme de hasar meydana gelirse bu gerilme değerini düşürür ve bu da malzemeyi daha zayıf yapar. Hasar plastik şekil değişimi ve eş değer kırılma şekil

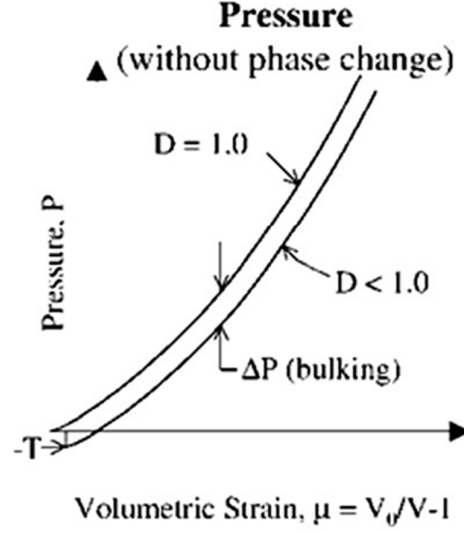
değişiminin toplamının oranı olarak tanımlanır. Malzemeler ya hasar $D = 1.0$ 'a eşit olduğu zaman ya da negative basınç gerilme limiti T 'ye ulaştığı zaman hasara uğrar. Malzeme dayanımı ve kırılması malzeme basıncına bağlıdır [50].



Şekil 5.5: JH-1 dayanım modeli[49].



Şekil 5.6: JH-1 hasar modeli[49].



Şekil 5.7: Basınç-Hacimsel değişim[50].

5.2.6.2. Seramik zırhlar için Johnson-Holmquist (JH) kırılma modeli

Johnson-Holmquist kırılma hasar modelleri üzerinde çalışma yapmışlardır. Bu çalışmalarda önemli nokta hasar, dayanım ve kırılmaya bağlı basınçtır. Hasar toplamını;

$$\Delta D = \frac{\Delta \epsilon_p}{\epsilon_p} \quad (5.47)$$

$$D = \frac{\Delta \epsilon_p}{\epsilon_p} \quad (5.48)$$

$$\epsilon_f = D_1 * (P^* + T^*)^{D_2} \quad (5.49)$$

Burada $\Delta \epsilon_p$ eşdeğer plastik şekil değişimi, ϵ_f sabit basınçta kırılma için gerekli plastik şekil değişimi, D_1 ve D_2 malzeme sabitleri, P^* basınç ve T^* maksimum hidrostatik gerilmedir [47].

Hidrostatik gerilme ifadesini basınç cinsinden yazarsak;

$$P = K_1 * \mu + K_2 * \mu^2 + K_3 * \mu^3 \quad (5.50)$$

ifadesini elde ederiz. Burada K_1 hacim modülü, K_2 , K_3 malzeme sabitleri ve μ sıkıştırılabilirlik faktörüdür [52].

5.31 nolu denklemde sıkıştırılabilirlik faktörü μ ifadesini tanımlamıştık.

Hasar meydana geldikten sonra, hacimsel yoğunlaşma meydana gelir ve 5.50 nolu denkleme basınç değişimi ΔP ekleriz.

$$P = K_1 * \mu + K_2 * \mu^2 + K_3 * \mu^3 + \Delta P \quad (5.51)$$

Burada meydana gelen basınç değişimi enerji değişimi olarak düşünülür: $D=0$ anında $\Delta P=0$ 'dan $D=1$ anında $\Delta P=P_{\max}$ 'dur.

Yumuşama ile iç enerji dağılır. İç enerjide gelen bu değişim enerji korunumu yasasına göre korumak için polinomal ifadeyle aşağıdaki gibi ifade ederiz. Burada ΔP kadarlık basınç değişimi için $t \rightarrow t + \Delta t$ olur.

$$\Delta P_{t+\Delta t} = -K_1 * \mu_{t+\Delta t} + \sqrt{(K_1 * \mu_{t+\Delta t} + \Delta P_t)^2 + 2 * \beta * K_1 * \Delta e} \quad (5.52)$$

Burada $\Delta e = e_{t+\Delta t} - e_t$ olarak ifade edilir ve Von-Mises gerilmesi $\bar{\sigma}$ ve elastik kayma modülü G ifadelerinden elde edile enerji değişimini ifade eder.

$$e = \frac{\sigma}{6G} \quad (5.53)$$

5.2.6.3. Mermi için kullanılan Johnson-Cook dayanım modeli

Johnson-Cook modeli Von- Mises akış gerilim ifadesi;

$$\sigma = [A + B \epsilon^n] * [1 + C * \ln \dot{\epsilon}^*] - [1 - T^{*m}] \quad (5.54)$$

Burada ϵ eşdeğer plastik şekil değişimini, $\dot{\epsilon}^* = \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0}$ boyutsuz şekil değişim oranını

ve T^* homojen sıcaklığı ifade eder. A , B , C , n ve m sabitlerdir. A akma gerilmesi, B ve n şekil değişim sertleşme etkisini ve C şekil değişim oran sabitini ifade eder.

5.2.6.4. Mermi için kullanılan Johnson-Cook kırılma modeli

Hasar ifadesini 5.47 nolu denklemde ifade etmiştik. Burada $\Delta\epsilon_p$ eşdeğer plastik şekil değişimi, ϵ_f mevcut koşullar altındaki (sıcaklık, şekil değişim oranı, gerilme ve basınç gibi) kırılma için gerekli şekil değişimidir. Kırılma olayı $D=1.0$ olduğu anda meydana gelir.

Plastik şekil değişiminin genel ifadesi;

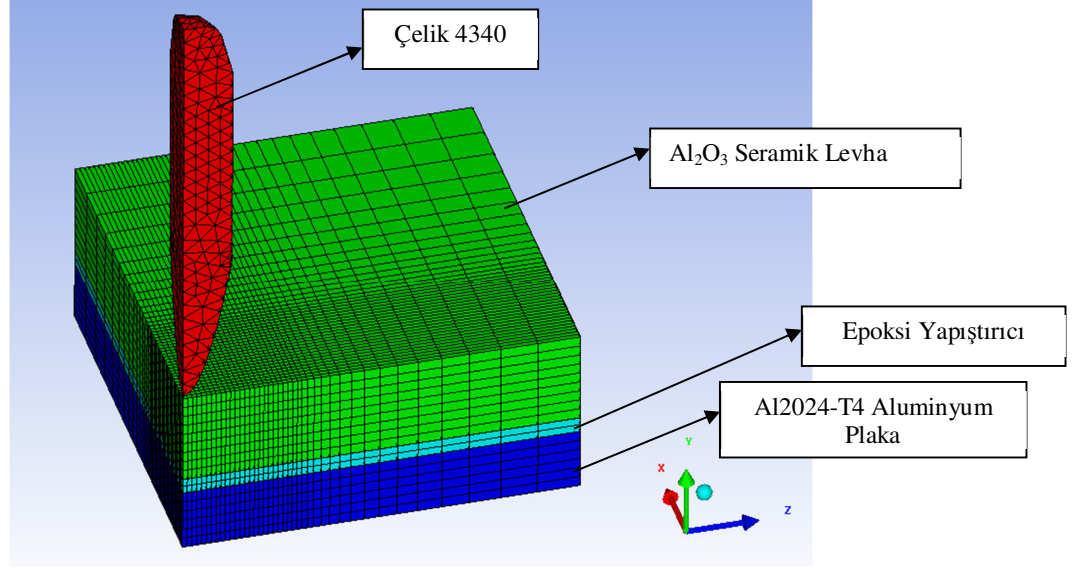
$$\epsilon_p^f = [D_1 + D_2 * \exp D_3 \sigma^*] * [1 + D_4 \ln \dot{\epsilon}^*] * [1 + D_5 * T^*] \quad (5.55)$$

$\sigma^*, \dot{\epsilon}^*, T^*$ değişkenlerinin sabit değerleri ve $\sigma^* \leq 1.5$ durumu içindir. Boyutsuz basınç-gerilme oranı $\sigma^* = \sigma_m / \sigma$ ve burada σ_m üç eksenli normal gerilme ortalaması ve σ Von Mises akma gerilmesidir. Boyutsuz şekil değişim oranı ve sıcaklık dayanım modelinde kullanımına benzerdir. Farklı parçalanma gerilme formülü yüksek anlamdaki gerilmeler ($\sigma^* > 1.5$) için kullanılır. D_1, D_2, D_3, D_4 ve D_5 sabittir. İlk braket ifadesinde kırılma için şekil değişimindeki azalma, gerilmenin artması anlamına gelir ve diğer braketlerdeki ifadeler şekil değişim oranı ve sıcaklık etkileri için izin verir [50].

$\sigma^*, \dot{\epsilon}^*, T^*$ değişkenleri çevrim boyunca sabit kalmayabilirler ve her bir çevrim için meydana gelen hasar artışının hesaplamak gerekebilir. Daha sonra hasar 1.0 değerine yaklaştıkça kırılmaya izin verecektir.

5.2.7. Kompozit zırhın nümerik analiz sonuçları

Bu çalışmada Seramik (Alumina) ön plaka ve Al2024-T4 ısıtıl işlem görmüş malzeme arka plaka olarak kullanılmış ve bu planda analizler gerçekleştirilmiştir. Çelik zırh delici mermi ile 850 m/sn hızında atışlar gerçekleştirildiği düşünülerek analizler gerçekleştirilmiştir. Yapıştırıcı kalınlığının yapı üzerinde etkisinin incelendiği analizde ise epoksi yapıştırıcı mevcut sisteme entegre edilmiştir. İlk olarak parametreler belirlenmiştir. Bu parametreler sonucunda elde edilen verilere göre asıl tasarımı planlanan model tasarlanmıştır. Tasarlanan modelin genel yapısını şekil 5.8'de görebiliriz.



Şekil 5.8. Autodyna programında tasarlanan zırh modeli.

Model x ve z eksenlerinde simetri olacak şekilde tasarlanmıştır. Explicit problemlerde sonuca ulaşmak için uzun süreler gerekmektedir. Bu yüzden zaman tasarrufu sağlamak için çeyrek model tasarlanmıştır. Kırmızı ile gösterilen mermi 6,17 mm çapında zırh delici (AP) çelik çekirdekli mermidir. Yeşil ile gösterilen Alumina levha, mavi renk epoksi yapıştırıcı ve lacivert renk ise Al20204-T4 levhayı göstermektedir. Al20204-T4 arka plaka 25 mm X 25 mm X 4 mm ebatlarında Lagrange çözücü kullanılarak tasarlanmıştır. Epoksi reçine 1mm, 2 mm ve 3 mm kalınlıklarında ve 25 mm X 25 mm ebatlarında lagrange çözücü kullanılarak tasarlanmıştır. Son olarak da seramik Al_2O_3 ön plaka 9 mm, 10 mm, 11 mm ve 12 mm değişen kalınlıklarda tasarlanmış olup ebatları 25 mm X 25 mm'dir. Zırh delici çelik çekirdekli mermi 6,17 mm çapında ve 27 mm uzunluğunda ANSYS Workbench modülünde tasarlanmıştır. Bütün analizler boyunca mermi hızı sabit ve 850 m/s olarak düşünülmüştür.

Çizelge 5.1, Çizelge 5.2, Çizelge 5.3 ve Çizelge 5.4 nolu çizelgelerde analizler sırasında kullanılan malzemelere ait özellikleri görebiliriz. Malzemelere ait bu özellikler AUTODYNA programının kütüphanesinde hazır olarak bulunan bilgilerden yararlanılmıştır.

Bu çalışmada farklı malzeme koşullarının katman sayının etkisi, ısıtım işlem durumunun etkisi, yapıştırıcı kalınlığının etkisi vb. gibi durumların etkisi araştırılmış ve son olarak da optimum zırh kombinasyonu elde edilmiştir.

Çizelge 5.1: Çelik mermi için malzeme model parametreleri[55].

Çelik 4340	
Yoğunluk (g/cm ³)	7.850
Bünye Denklemleri (Lineer)	
Hacim Modülü (GPa)	159
Dayanım Verileri (Johnson–Cook)	
Kesme modülü (GPa)	77
Akma Gerilmesi (GPa)	0,79
Sertleşme Sabiti –B (GPa)	0,51
Sertleşme Üsteli-n	0,26
Sekil Değiştirme Sabiti-C	0,014
Termal Yumuşama Üsteli-m	1,03
Hasar Verileri (Johnson–Cook)	
Hasar Sabiti-D ₁	0,05
Hasar Sabiti-D ₂	3,44
Hasar Sabiti-D ₃	-2,12
Hasar Sabiti-D ₄	0,002
Hasar Sabiti-D ₅	0,61

Çizelge 5.2: Alüminyum Oksit Ön levha için malzeme model parametreleri[55].

Alüminyum Oksit (Al_2O_3)	
Yoğunluk (g/cm^3)	3,800
Bünye Denklemi (Polinomal)	
Hacim Modülü- A_1 (GPa)	200
Parametre – T_1 (GPa)	200
Dayanım Dataları (Johnson–Holmquist)	
Kesme Modülü (GPa)	135
HEL (GPa)	0,59
Sağlam Dayanım Sabiti -A	0,989
Sağlam Dayanım Üsteli-N	0,375
Kırılma Dayanım Sabiti-B	0,77
Kırılma Dayanım Üsteli-M	1,000
Mak. Kırılma Dayanım Oranı	0,5
Dayanım Dataları (Johnson–Holmquist)	
Hidro Çekme Limiti-T (GPa)	-290
Hasar Sabiti- D_1	0,01
Hasar Sabiti- D_2	1,00
Hacim Sabiti- β	1,000

Çizelge 5.3: Alüminyum 2024 –T4 arka levha için malzeme model parametreleri[55].

Al2024-T4	
Yoğunluk (g/cm ³)	2,785
Bünye Verileri (Şok)	
Gruneissen Katsayısı	2,000
Parametre C ₁ (m/s)	5,328*10 ³
Parametre S ₁	1,338
Dayanım Verileri (Steinberg Guinan)	
Kesme Modülü (GPa)	28,6
Akma Gerilmesi (GPa)	0,26
Maksimum Akma Gerilmesi (GPa)	0,76
Sertleşme Sabiti	310
Sertleşme Üsteli	0,185
dG/dP türevi	1,864
dG/dT türevi (kPa/K)	-1,762*10 ⁴
dY/dP türevi	0,0169

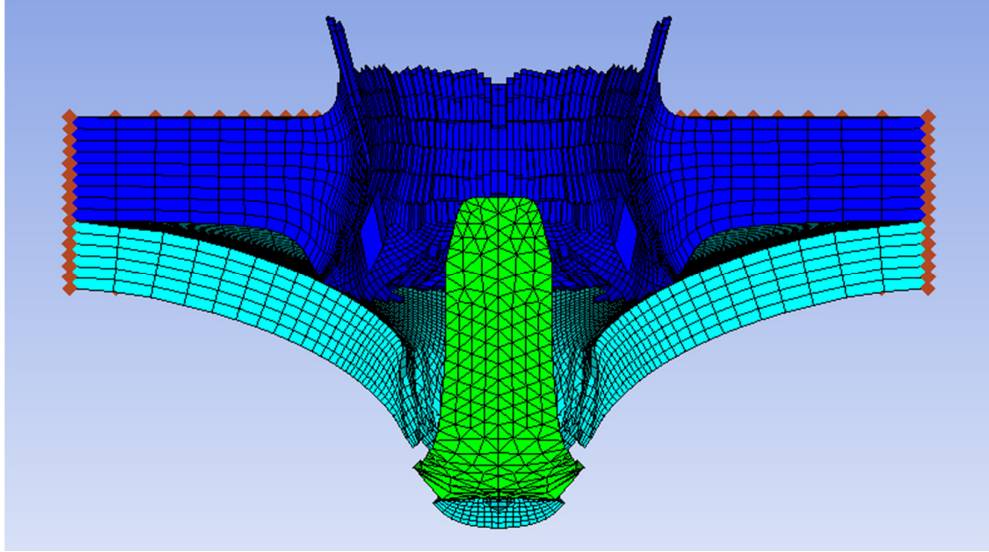
Çizelge 5.4: Alüminyum arka levha için malzeme model parametreleri[55].

Alüminyum	
Yoğunluk (g/cm ³)	2,71
Bünye Verileri (Shock)	
Gruneissen Katsayısı	2,1000
Parametre C ₁ (m/s)	5,38*10 ³
Parametre S ₁	1,337
Dayanım Verileri (Von Mises)	
Kesme Modülü (GPa)	26,9
Akma Gerilmesi (GPa)	0,29

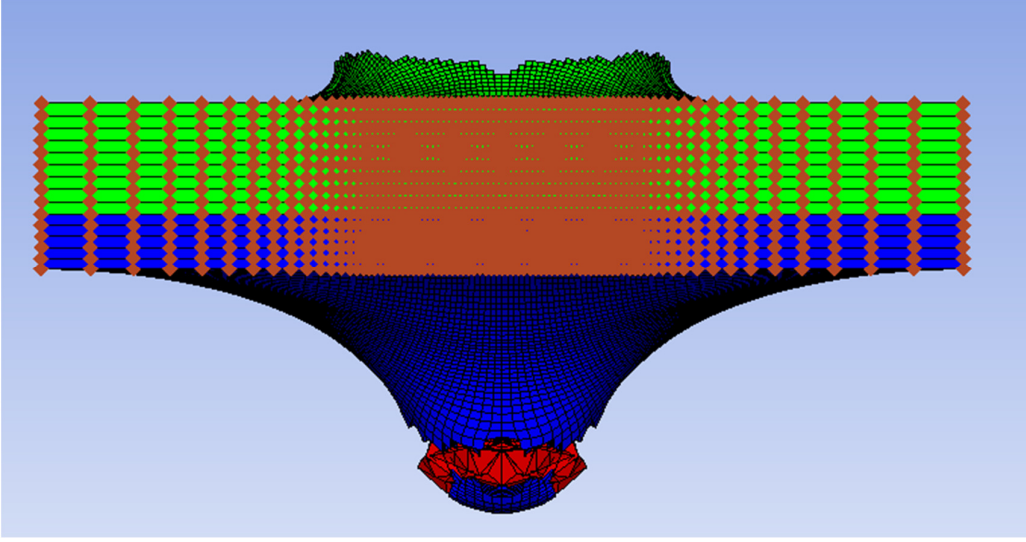
5.2.7.1. Zırh sistemine ön gerilme kuvveti uygulanması

Bu çalışmada zırh sisteminin 3 yönden ve sadece merminin geldiği yönden hareketi sınırlandırılmıştır. Çalışmanın amacı sistemde ilk olarak 3 eksenenden hareket etmesi kısıtlanarak ön gerilme oluşturulması amaçlanmış ve merminin çıkış hızı hesaplanmıştır. Daha sonra sadece merminin geldiği yönde hareket sınırlandırılmış, diğer iki yönde harekete izin verilmiştir. Amaç ön gerilmenin sistem üzerindeki etkisinin incelenmesidir.

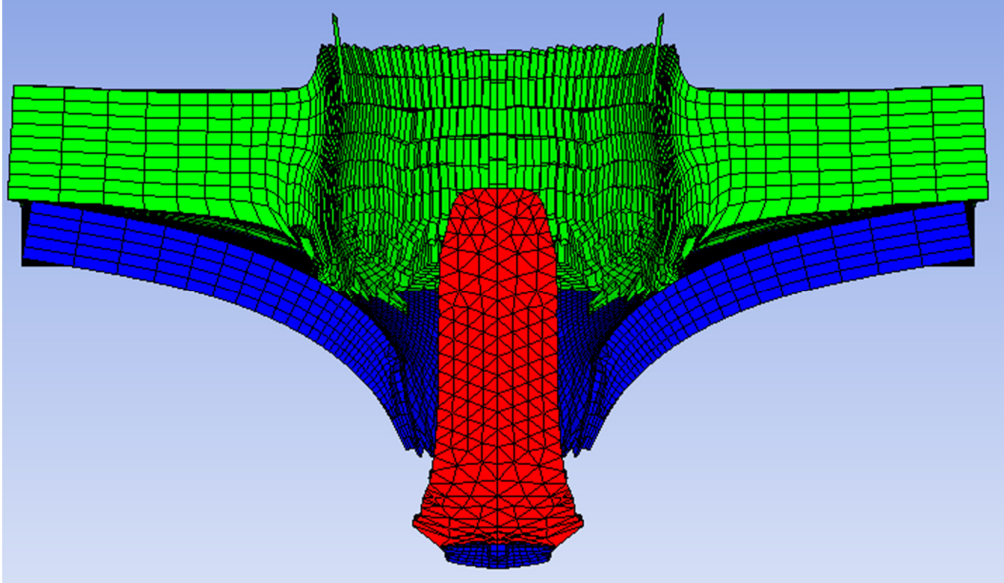
Bu çalışmada 25 mm * 25 mm * 6 mm ebatlarında seramik ön levha ve 25 mm * 25 mm * 4 mm ebatlarında Al2024-T4 arka destek plakası kullanılmıştır. Şekil 5.9 ve Şekil 5.10'da her 3 eksenenden hareketi sabitlenmiş sistemde merminin sistemi terk edişinin ön ve arka görüşünü, şekil 5.11 ve şekil 5.12'de sadece merminin geliş yönünde hareketi engellenmiş merminin sistemi terk edişinin ön ve arka görünüşünü, şekil 5.13'de merminin sistemi terk ediş hızının zamana bağlı değişim grafiğini görmekteyiz.



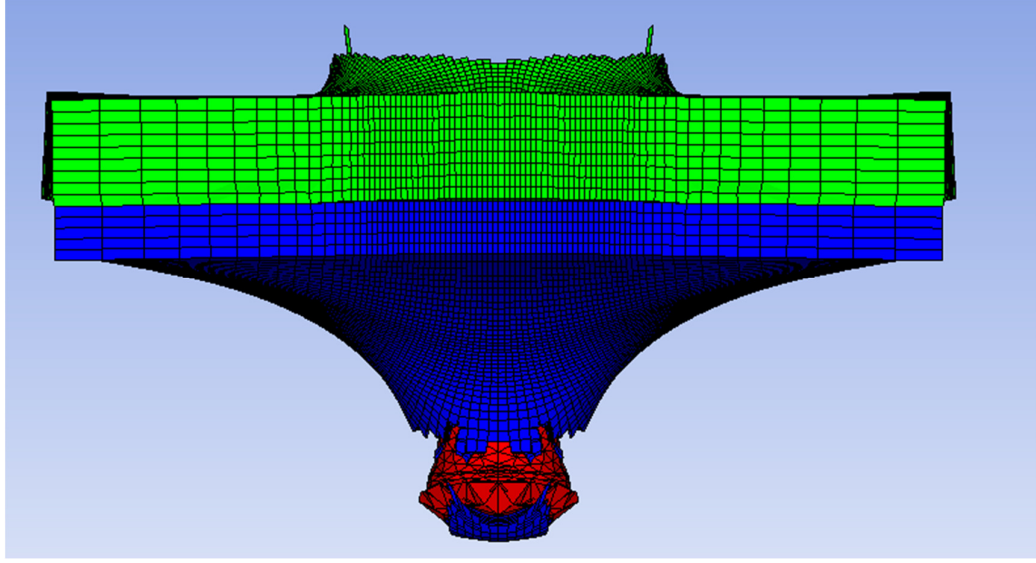
Şekil 5.9: 3 eksenenden hareketi engellenmiş sistemden merminin çıkışının ön görüntüsü.



Şekil 5.10: 3 eksenli hareketi engellenmiş sistemden merminin çıkışının arka görüntüsü.



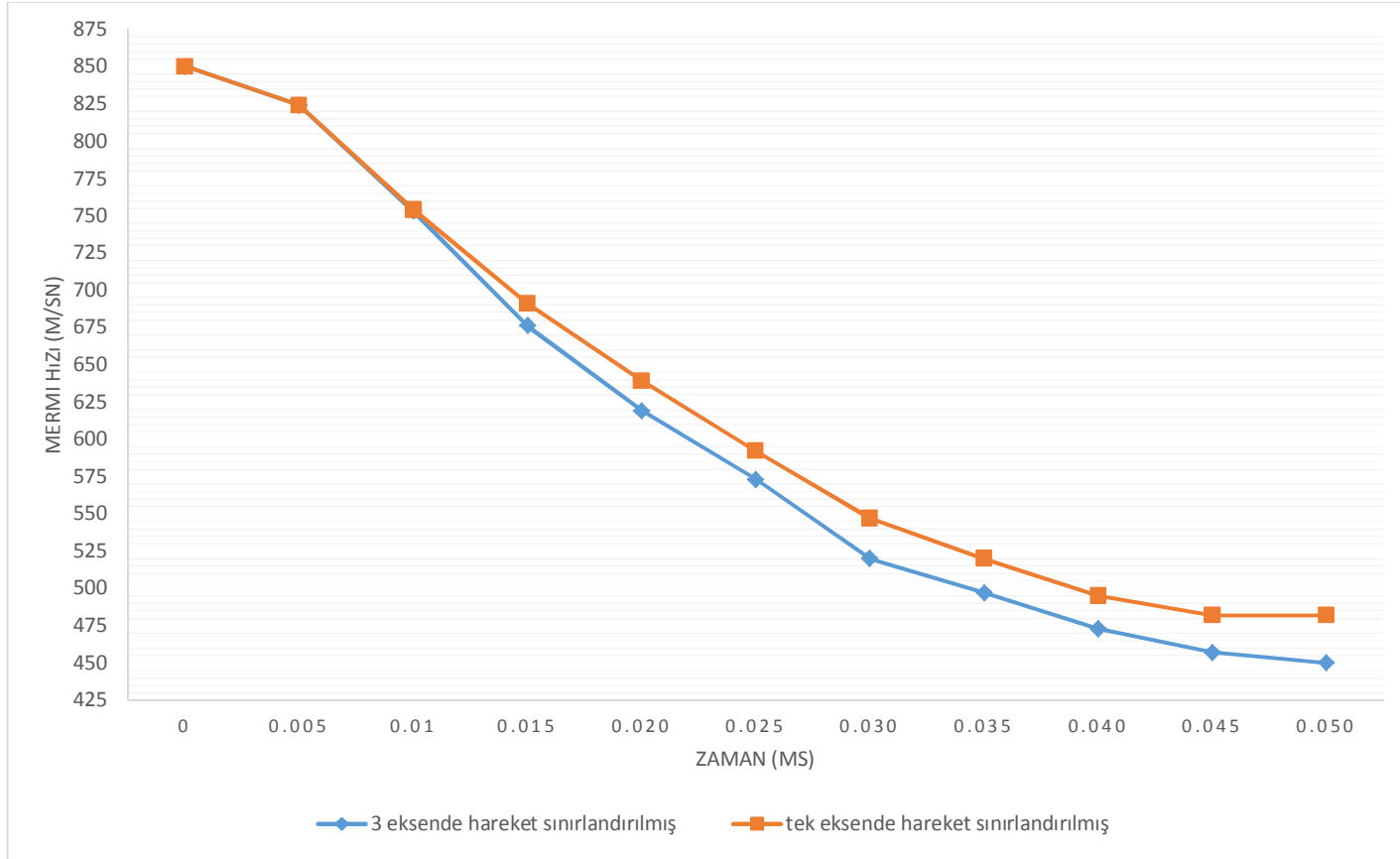
Şekil 5.11: Sadece merminin geliş yönünde hareketi engellenmiş merminin çıkışının ön görüntüsü.



Şekil 5.12: Sadece merminin geliş yönünde hareketi engellenmiş merminin çıkışının arka görüntüsü.

Şekil 5.13’de yapılan analiz sonucunda sistemin her 3 ekseninde hareketi engellendiği zaman 0.05 ms sonunda çıkış hızı 450 m/s iken, sadece merminin geliş yönünden hareketi engellendiği zaman çıkış hızı 482 m/s olduğu görülmektedir. Bunun sebebi merminin diğer yönlerde hareketi engellendiği zaman plaka oluşan gerilme etkisiyle hareket etmeye çalışmak isteyecektir. Fakat 3 ekseninde hareketin engellenmesi buna imkan vermeyecek ve bu durumda sistemde bir gerilme oluşacaktır. Bu oluşan gerilme de sisteme pozitif bir etki yapmaktadır. Oluşan gerilme mermi hızını yavaşlatmadır. Bu oluşan gerilme kuvvetinin etkisiyle sistemin dayanımının artması ve buna bağlı olarak da daha dayanıklı bir yapının elde edildiği sonucuna varabiliriz. Bu parametrenin seçilmesinin amacı sistemde bir ön gerilme oluşmasının sistem üzerindeki etkisi incelenmeye çalışılmıştır. Bu parameter programda tanıtilamadığı için eksenel hareketi kısıtlanarak hedefe ulaşmaya çalışılmıştır. Elde edilen sonuca göre sistem hareketinin engellenmesi mermi hızını diğer duruma göre %7.2 oranında daha fazla yavaşlattığı görülmektedir.

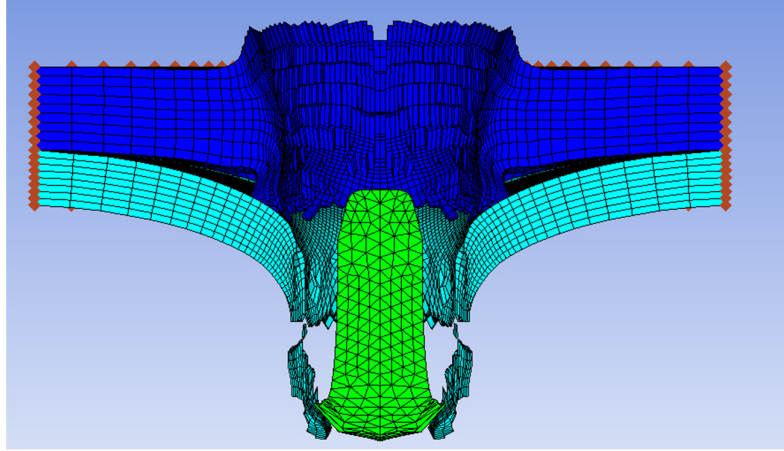
Benzer bir çalışma deneysel olarak Holmquist ve Johnson [53] tarafından da gerçekleştirilmiştir. Çalışmada farklı kalınlıklarda ve farklı ön gerilme koşulları altında seramik malzemeye ön gerilme kuvveti uygulamışlar ve sonuçlarını değerlendirmişlerdir. Yapılan çalışma sonucunda ön gerilme kuvvetinin sistemin mekanik özelliklerini iyileştirdiği ve bunun sonucunda ön gerilme kuvveti olmayan yapıya göre daha dayanıklı bir yapının oluştuğu sonucuna varmışlardır.



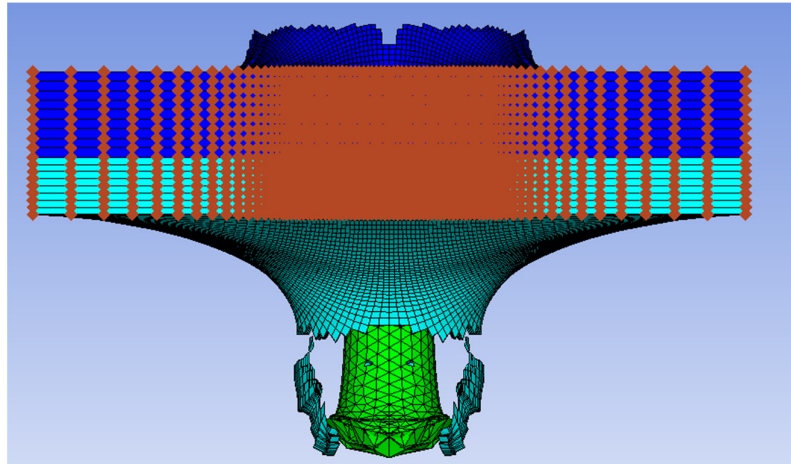
Şekil 5.13: Mermi hızının zamana bağlı olarak değişimi.

5.2.7.2. Arka destek plakası olarak farklı ısıtılmış malzemelerin kullanılması

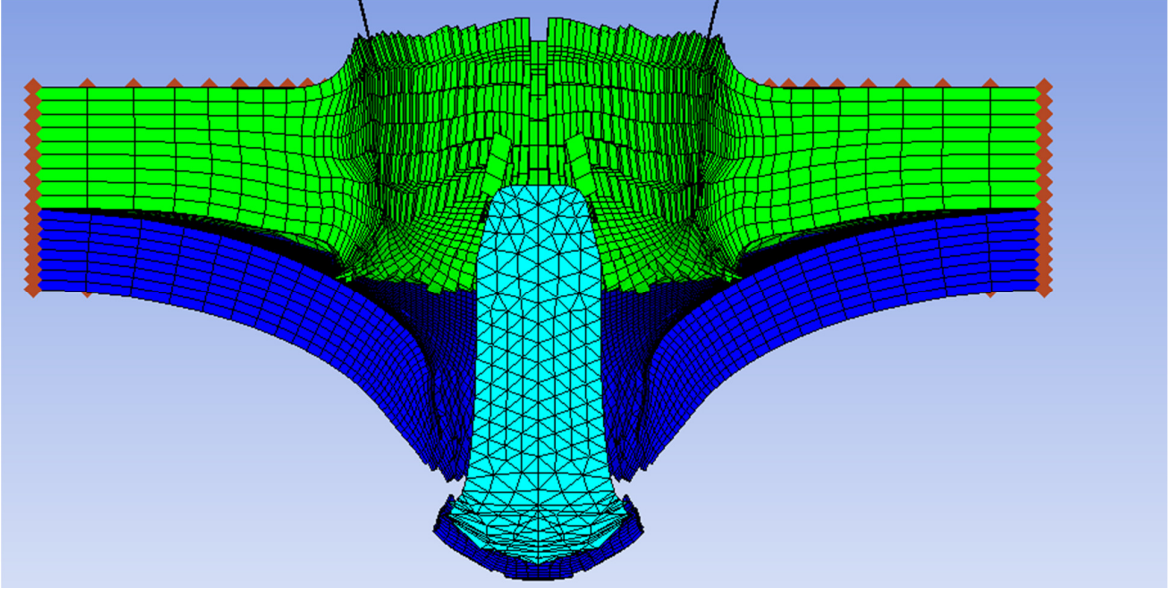
Bu çalışmada farklı ısıtılmış durumlarının destek sistem üzerinde etkisinin olup olmadığı anlaşılmaya çalışılmıştır. Analizlerde Alüminyum, Al2024-T3 ve Al2024-T4 ısıtılmış malzemeler kullanılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Zırh tasarımı 25 mm * 25 mm * 6 mm ebatlarında ön seramik plaka ve 25 mm * 25 mm * 4 mm ebatlarında arka destek plakası şeklinde tasarlanmıştır. Atışlarda mermi hızı 850 m/sn olarak düşünülmüş ve 3 ekseninde de hareket etmesi kısıtlanmıştır. Atış sonrası mermi çıkışlarını aşağıdaki şekillerde görebiliriz. Şekil 5.14 ve Şekil 5.15’de Alüminyum destek plaka kullanılan malzemeye ait mermi çıkışını, Şekil 5.16 ve Şekil 5.17’de Al2024-T3 destek plaka kullanılan malzemeye ait mermi çıkışını, Şekil 5.17 ve Şekil 5.18’de ise Al2024-T4 arka destek plaka kullanılan sisteme ait mermi çıkışını görmekteyiz.



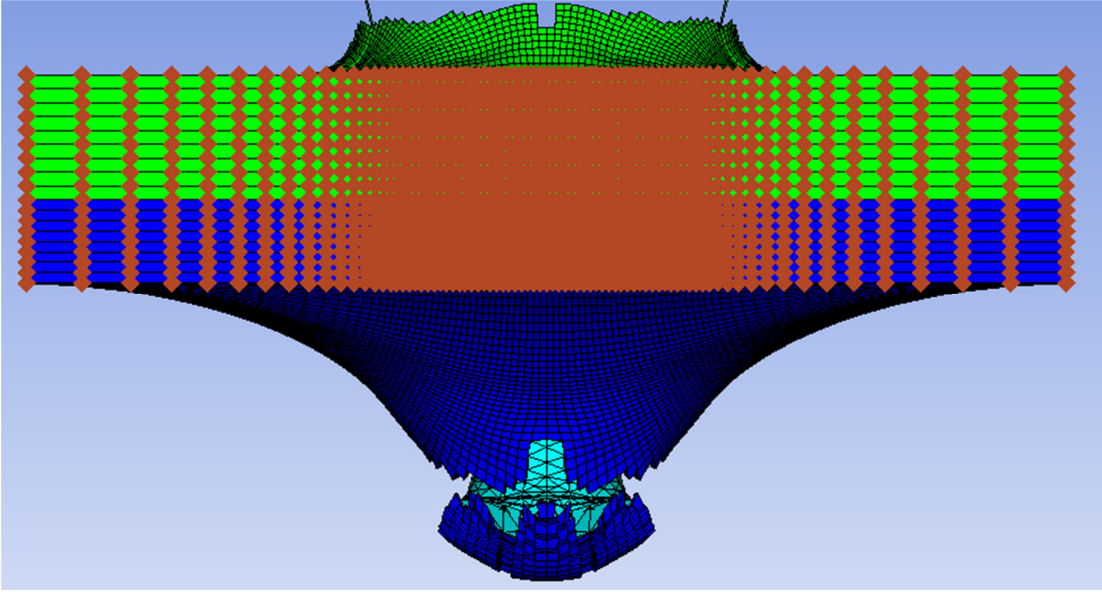
Şekil 5.14: Alüminyum malzemenin atış sonrası ön görüntüsü.



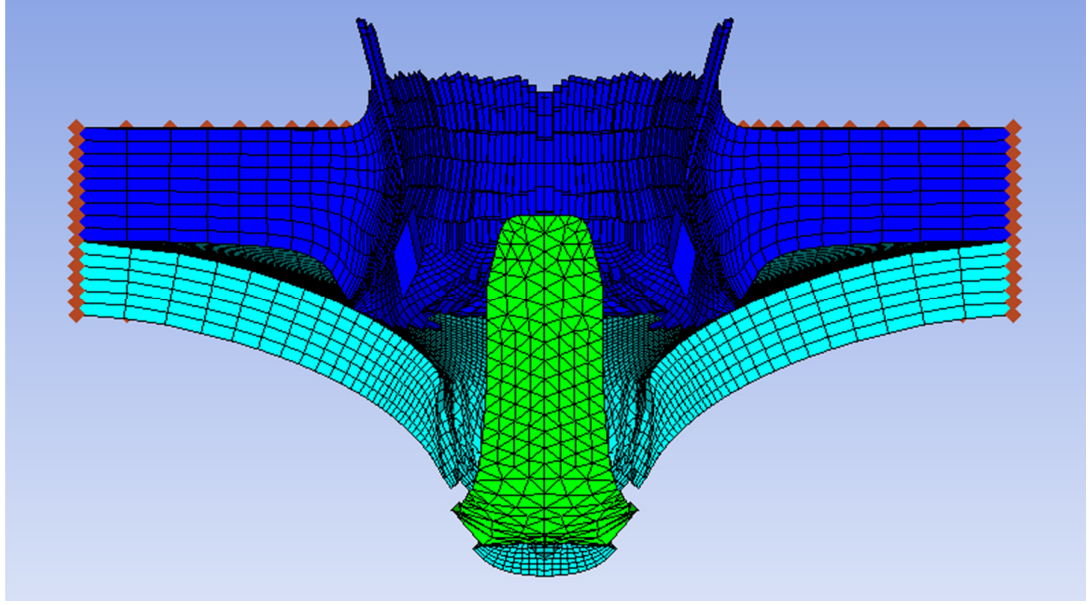
Şekil 5.15: Alüminyum malzemenin atış sonrası arka görüntüsü.



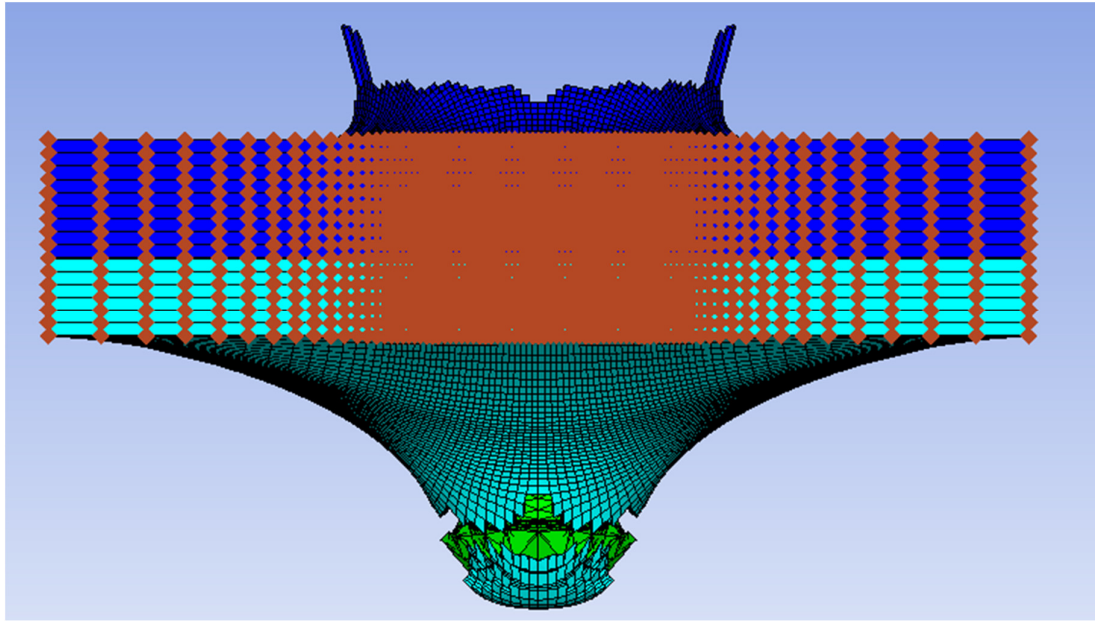
Şekil 5.16: Al2020-T3 Malzemenin atış sonrası ön görüntüsü.



Şekil 5.17: Al2020-T3 Malzemenin atış sonrası arka görüntüsü.



Şekil 5.18: Al2020-T4 Malzemenin atış sonrası ön görüntüsü.

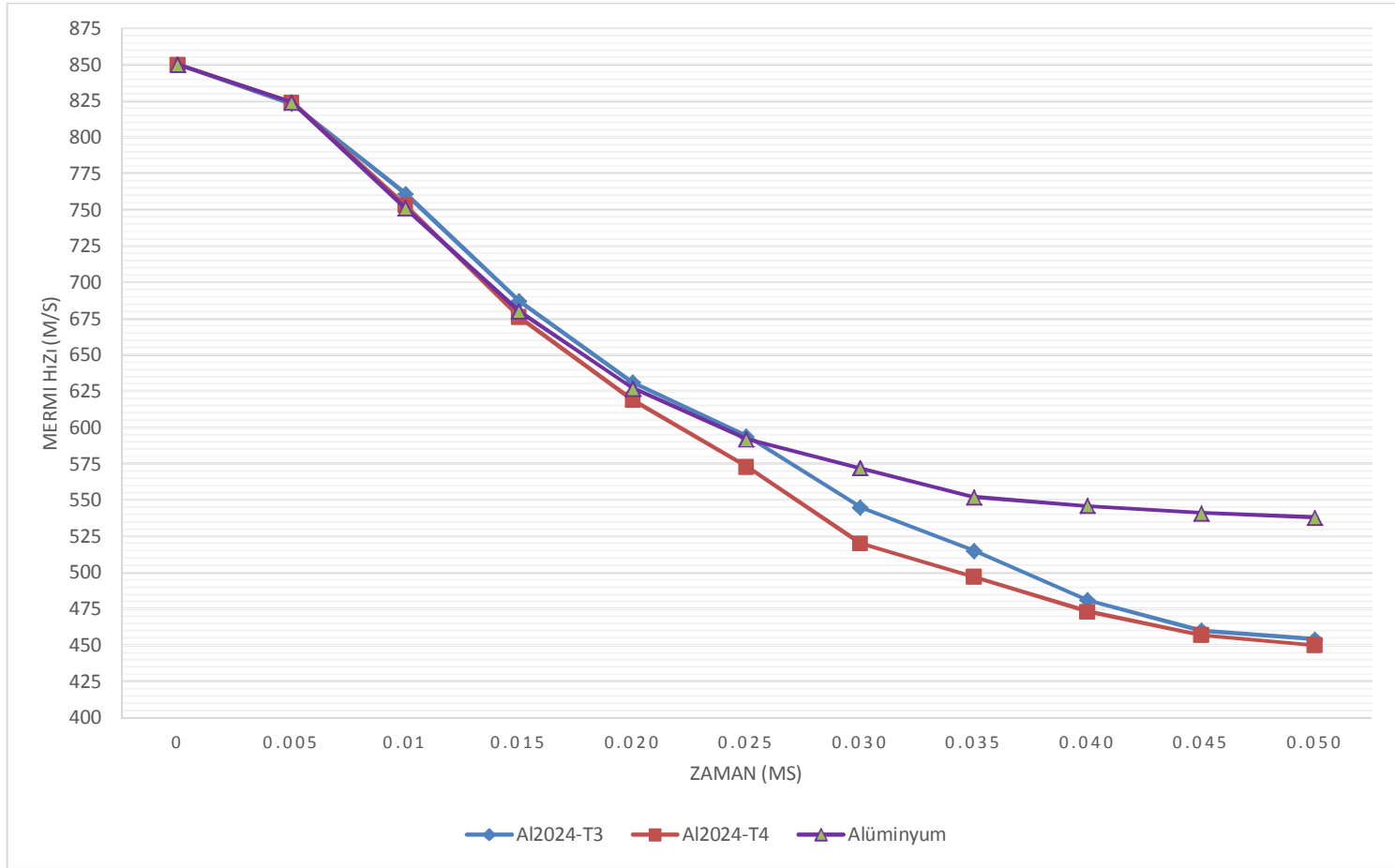


Şekil 5.19: Al2020-T4 Malzemenin atış sonrası arka görüntüsü.

Isıl işlemin amacı metal malzemelerin iç yapılarını malzeme özelliklerini iyileştirmek için yapılan ısı temeline dayanan bir işlemdir. Isıl işlem uygulaması malzemenin belli bir sıcaklığa kadar ısıtılması, o sıcaklıkta belli bir süre tutulması ve sonra belli hızlarda soğutulmasını kapsar.

Alüminyum, Al2024-T3 ve Al2024-T4 malzemeleri kıyaslandığı zaman Al2024-T4 malzemesinden oluşan sistem daha iyi sonuç vermiştir. Bu çalışma yapılırken amaç sünek malzemedan oluşan bir destek sistemi mi daha iyi dirençli olur yoksa sert bir destek plakasında oluşan bir sistem mi daha dirençli olur sorusunun cevabı araştırılmaya çalışılmıştır. Yapılan çalışma sonucunda mekanik özellikleri birbirine yakın olan Al2024-T3 ve Al2024-T4 malzemelerinin mermi çıkış hızları da birbirine yakın çıkmıştır. Al20204-T4 destek plakasından oluşan sistemde mermi 450 m/sn, Al2024-T3 destek plakasından oluşan zırh sisteminde mermi 454 m/sn hızla sistemi terk etmiştir. Alüminyumdan oluşan sistemde ise mermi 538 m/sn ile sistemi terk etmiştir. Mekanik özellikleri iyileştirmiş olan Al2024-T3 ve Al2024-T4'den oluşan zırh sistemi alüminyumdan oluşan sisteme göre mermi hızını %20 oranında azaltmıştır. Bunun sebebi olarak ısıtılma işlemde malzeme dayanımı artmış ve sertliği artmış ve sonuç olarak daha dayanıklı bir yapı ortaya çıkmıştır. Destek plakasının amacı merminin çarpması sonucu oluşan gerilme karşısında sistemde bir eğme kuvveti oluşacak ve bu kuvvete karşı karşı koymaktır. Bu durumda ne kadar dayanıklı malzeme kullanılırsa sistem oluşan kuvvete daha fazla direnç gösterir. Şekil 5.20'de merminin sistemi terk ediş hızını görmekteyiz.

Mustafa Übeyli ve arkadaşları farklı ısıtılma koşullarının sistem üzerindeki etkisini incelemişler ve deneysel olarak çalışma yapmışlardır. Yaptıkları çalışmada Al2020-0 ve Al2024-T6 malzeme kullanmışlar. Deney sonucunda T6 fazındaki malzemenin daha dayanıklı olduğu sonucuna varmışlardır [54].



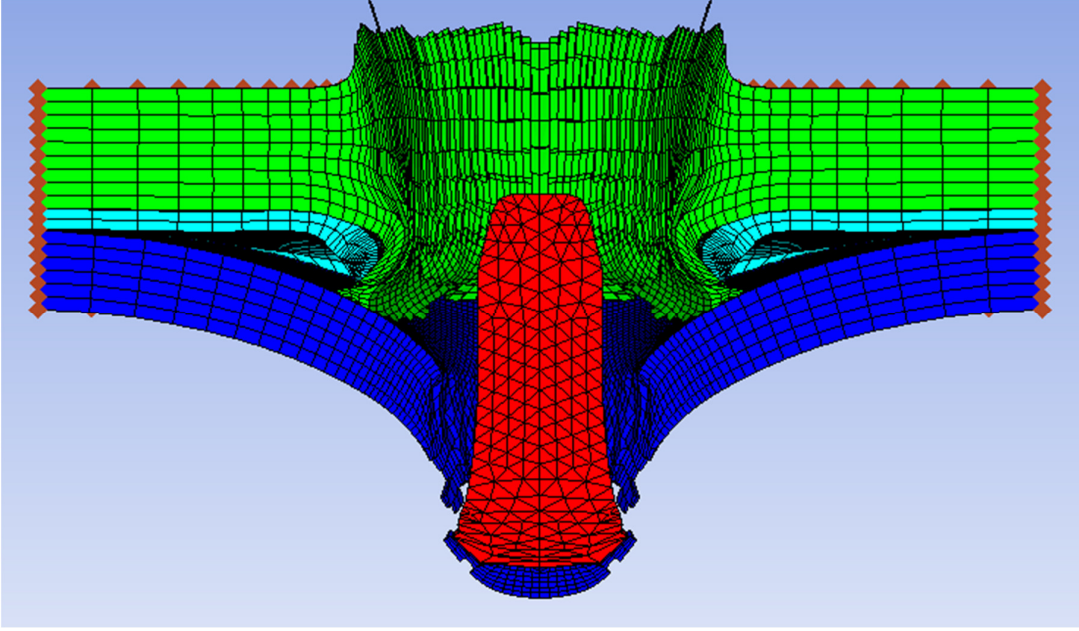
Şekil 5.20: Isıl işlem durumu farklı malzeme kullanılan sistemden mermi çıkış hızının zamana bağlı değişimi.

5.2.7.3. Yapıştırıcı kalınlığının arttırılmasının sistem üzerindeki etkisinin incelenmesi

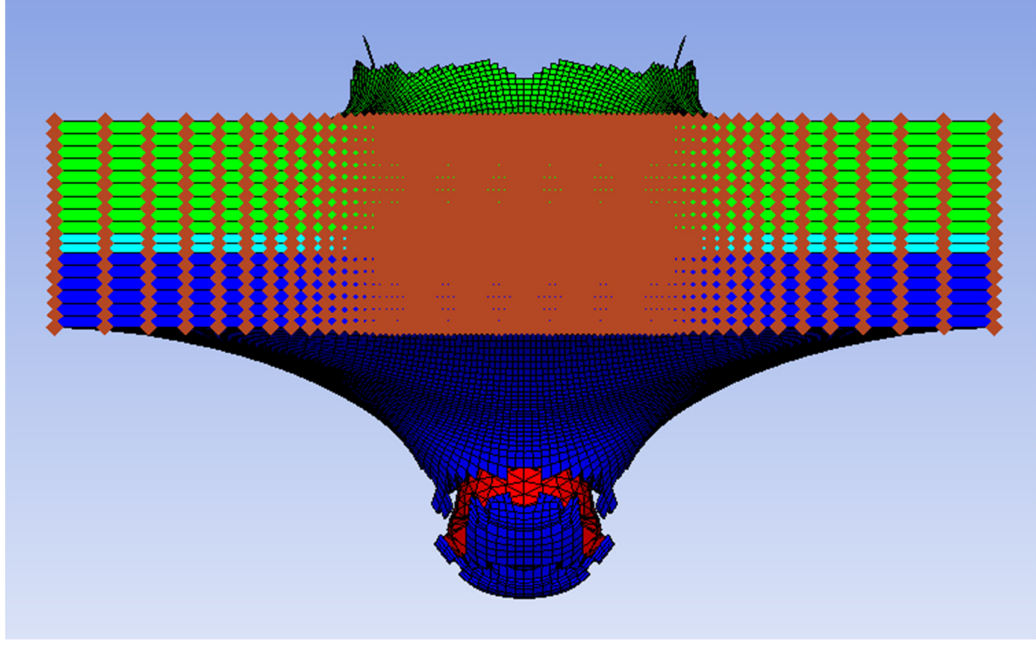
Bu çalışmada farklı kalınlıklarda epoksi yapıştırıcı kullanılmış ve yapıştırıcı kalınlığının sistem üzerinde etkisi olup olmadığı, eğer etkili ise bunun hangi yönde olduğu anlaşılmaya çalışılmıştır. Ayrıca analiz sonucunda literatürde yapılan çalışma ile karşılaştırılmıştır.

Bu analizde 25 mm * 25 mm * 6 mm ebatlarında ön seramik levha, yapıştırıcı olmayan durum, 1 mm ve 2 mm kalınlıklarında yapıştırıcı ve 25 mm * 25 mm * 4 mm ebatlarında Al2024-T4 destek katmanı seçilmiştir.

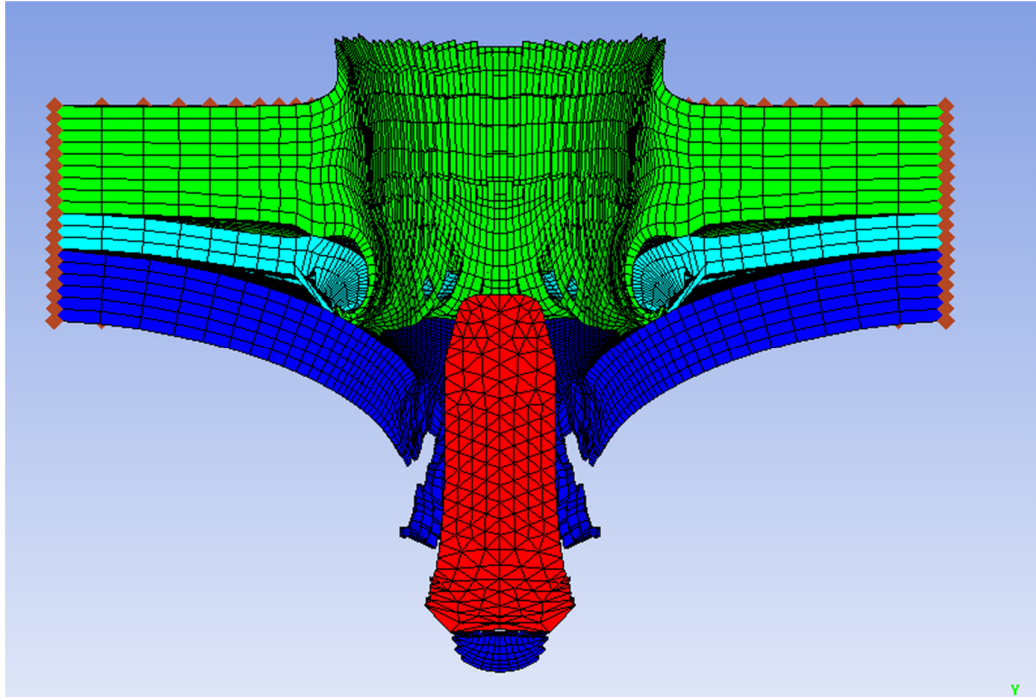
Atışlar sonrası merminin çıkış görüntüleri 1 mm için Şekil 5.21 ve Şekil 5.22, 2 mm için Şekil 5.23 ve Şekil 5.24, yapıştırıcı kullanılmayan durum için ise Şekil 5.25 ve Şekil 5.26'da verilmiştir. Mermi çıkış hızlarının karşılaştırılmasını ise Şekil 5.27'deki grafikte gösterilmiştir.



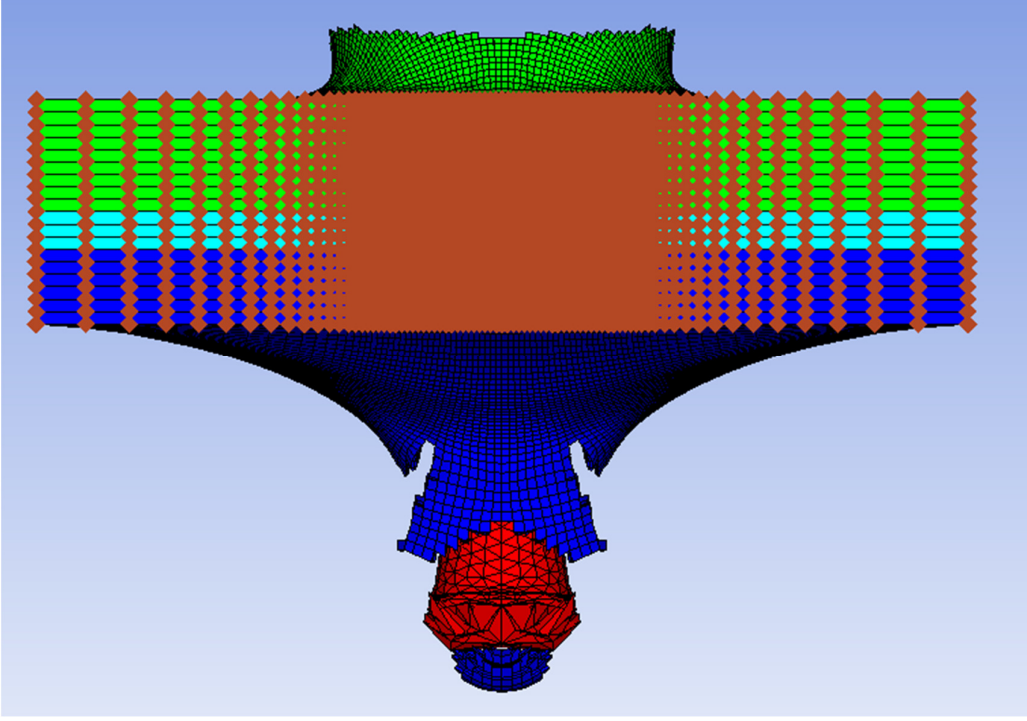
Şekil 5.21: Yapıştırıcı kalınlığı 1 mm olan sistemin sonrası ön görüntüsü.



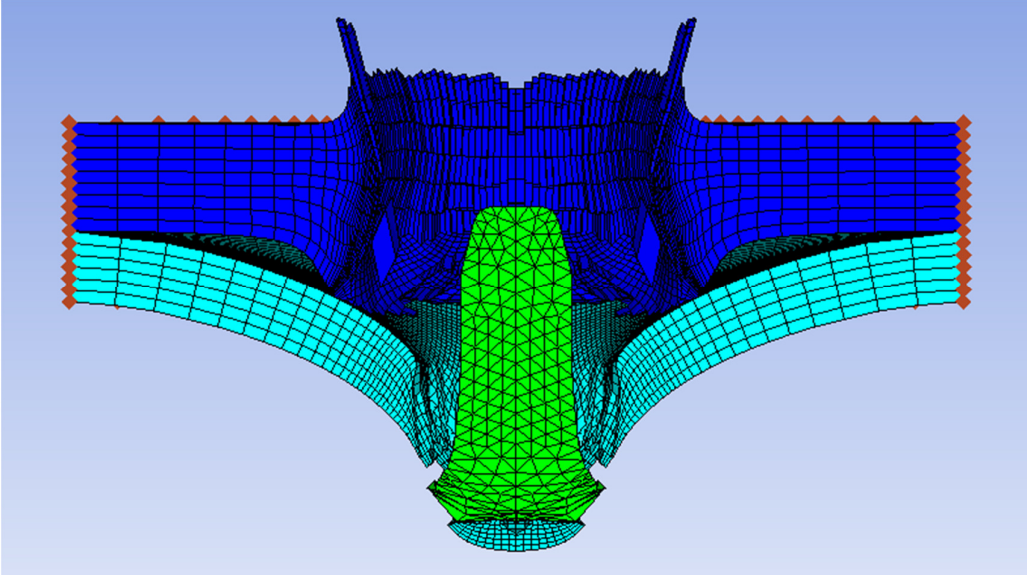
Şekil 5.22: Yapıştırıcı kalınlığı 1 mm olan sistemin sonrası arka görüntüsü.



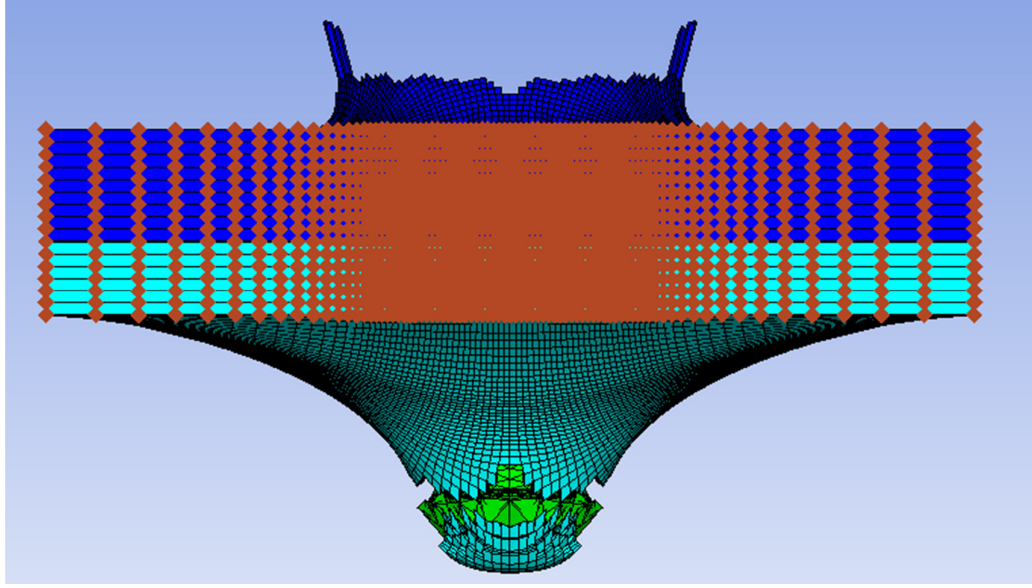
Şekil 5.23: Yapıştırıcı kalınlığı 2 mm olan sistemin sonrası ön görüntüsü.



Şekil 5.24: Yapıştırıcı kalınlığı 2 mm olan sistemin sonrası arka görüntüsü.



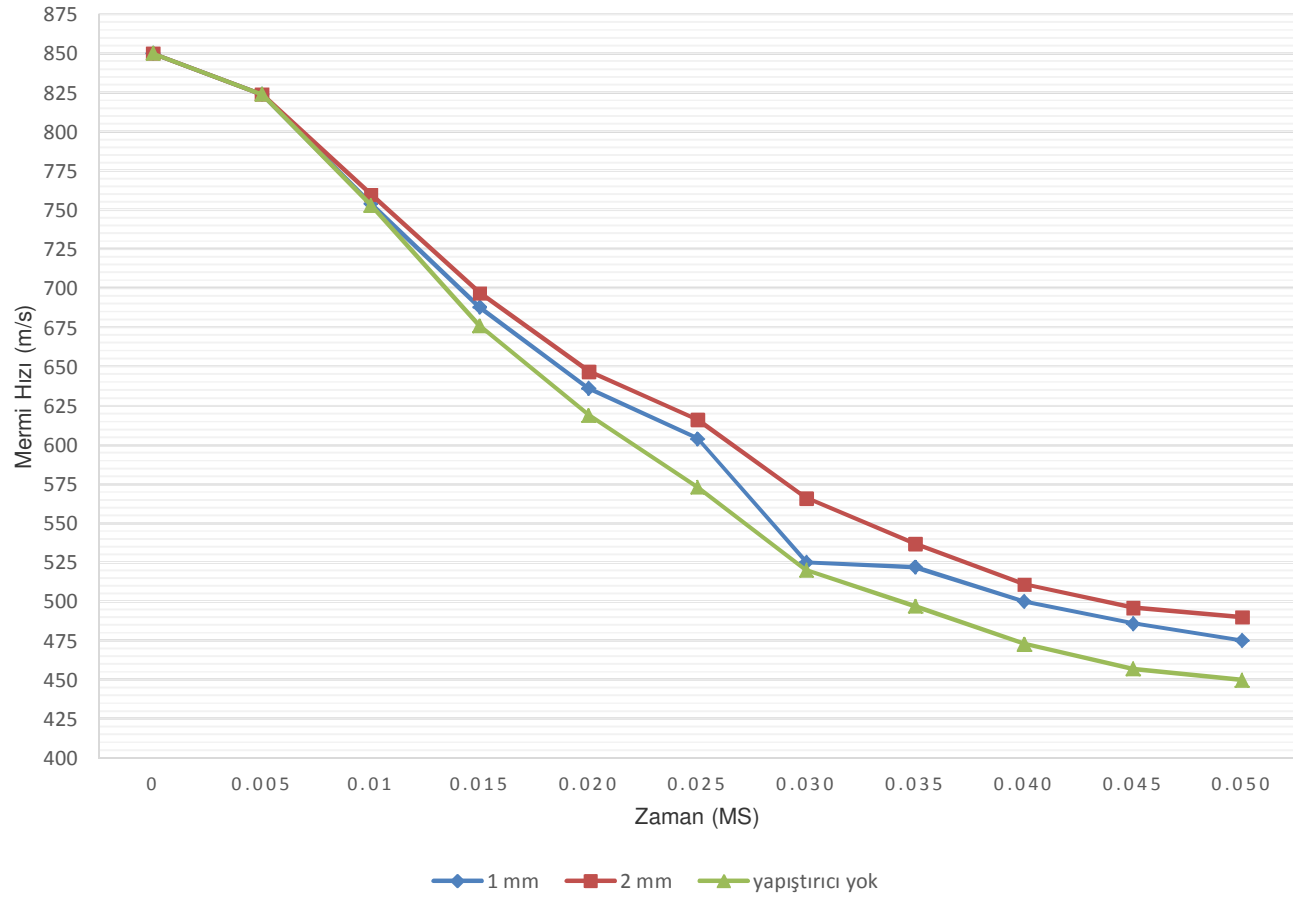
Şekil 5.25: Yapıştırıcı kullanılmayan sistemin sonrası ön görüntüsü.



Şekil 5.26: Yapıştırıcı kullanılmayan sistemin sonrası arka görüntüsü.

Yapılan analizler sonucuna bakılırsa sistemde yapıştırma kullanılması veya yapıştırıcı kalınlığının arttırılması model üzerinde olumlu bir etkisinin olmadığını görmekteyiz. Alüminyum oksit ve Al2024-T4 destek plakası arasına yapıştırıcı kullanmazsak mermi sistemi 450 m/sn hızında terk ettiğini görüyoruz. Eğer bu araya 1 mm kalınlığında epoksi yapıştırıcı kullanılırsa mermi hızı 475 m/sn ile modeli terk ediyor. Eğer 2 mm epoksi yapıştırıcı kullanırsak 490 m/sn hızında mermi modeli terk ediyor. Bu sonuçları kıyasladığımız zaman yapıştırıcı kullanılmayan durum 1 mm kalınlığında yapıştırıcı kullanılan duruma göre mermi hızını %5.3 düşürdüğünü söyleyebiliriz. Aynı durumda 1 mm kalınlıkta kullanılan yapıştırıcı 2 mm yapıştırıcı kullanılan modele göre mermi hızını %3.15 oranında düşürmüştür. Bu sonuçlara göre sistemde yapıştırıcının olumlu değil aksine olumsuz etkisinin olduğunu söyleyebiliriz.

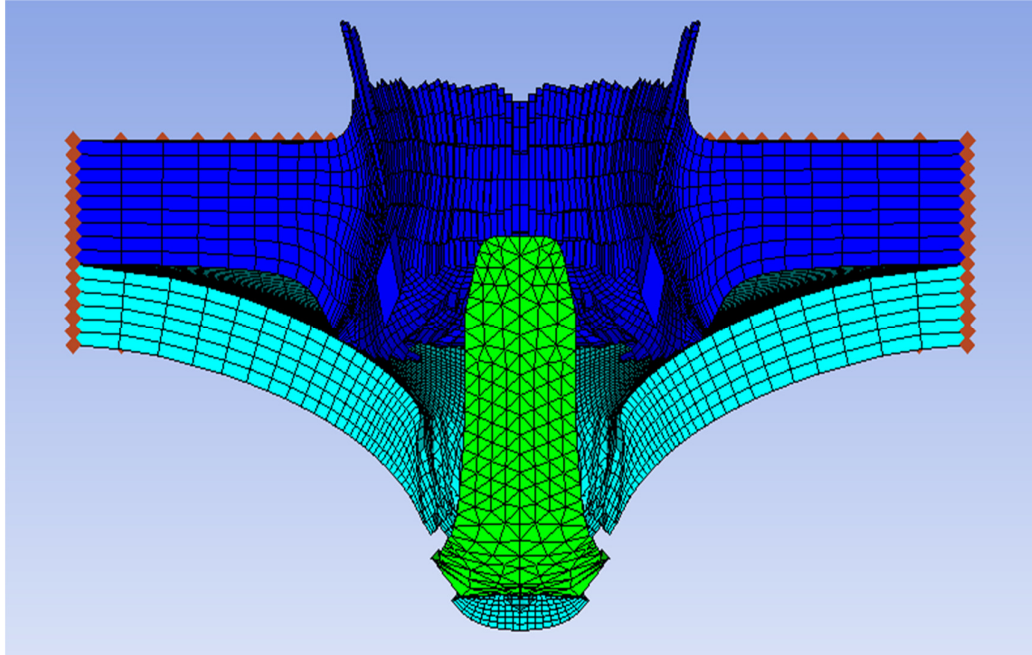
Yapıştırıcı kullanılması seramik malzemelerin bir arada tutulması için olumlu etki yaratabilir. Seramik yapıyı bir arada tutarak çabuk dağılmasını engeller. Fakat merminin çarpması sonrası oluşan gerilmeyi destek plakasına iletmesini geciktirdiği için seramik levhanın mermiye karşı gösterdiği dirence olumsuz etki yaptığını düşünebiliriz. Bu durumda yapıştırıcı kullanılmak istersek mümkün olduğunca kalınlığı minimum oranda kullanmakta fayda olduğunu söyleyebiliriz. Şekil 5.25’de mermi çıkış hızının zaman bağlı grafiğini görmekteyiz.



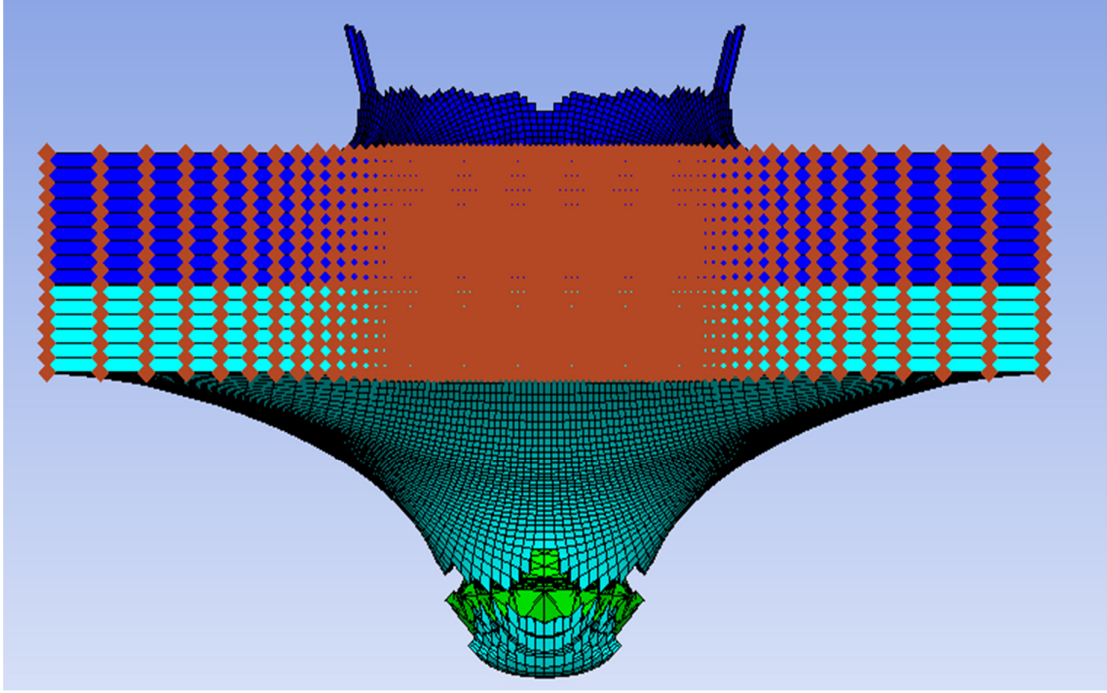
Şekil 5.27: Yapıştırıcı kalınlığına bağlı olarak merminin sistemden çıkış hız.

5.2.7.4. Destek plakanın katmanlı bir yapı oluşturulmasında sistem üzerine etkisinin incelenmesi

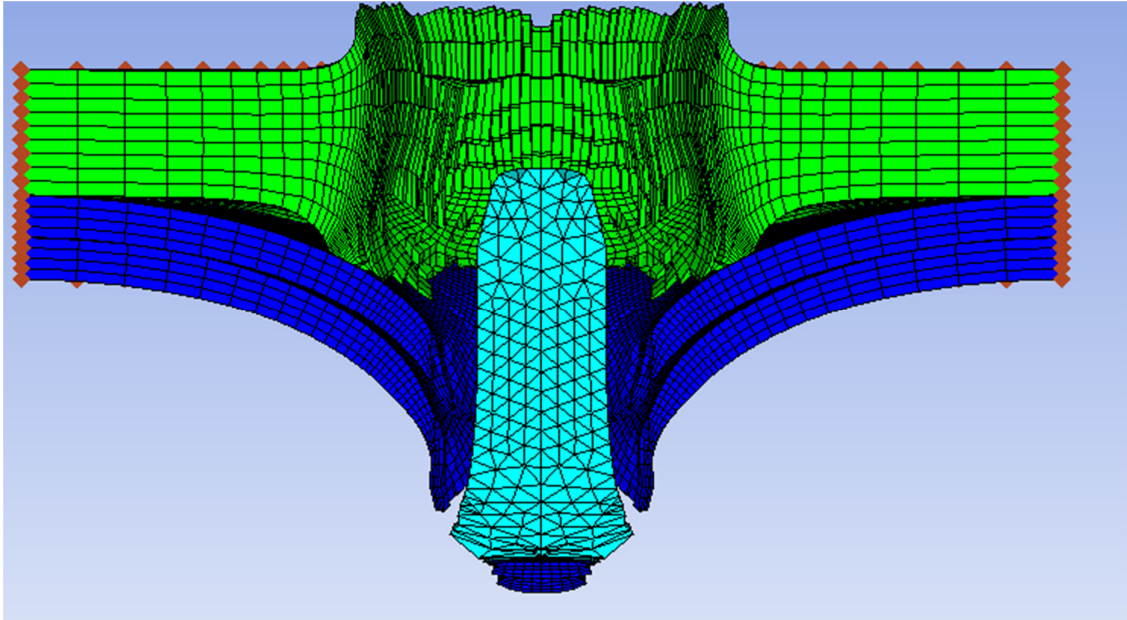
Bu analiz çalışmasında kalınlık sayısı sabit tutularak katman sayısının sistem üzerindeki etkisi incelenmeye çalışılmıştır. Çalışmada hem alüminyum hem de seramik levha farklı katmanlara ayrılmıştır. Katmanlı bir yapı kullanmak sistem üzerinde pozitif mi yoksa negatif mi etki yaratacağı incelenmiştir. Seramik plaka 25 mm * 25 mm * 6 mm ebatlarında, ve arka destek plakası ise 25 mm * 25 mm 4 mm ebatlarında tasarlanmıştır. Arka plaka tek katmanlı (1 * 4 mm), iki katmanlı (2 * 2 mm) ve 3 katmanlı (3 * 4/3 mm) olarak tasarlanmıştır. Alüminyum oksit levha ise (3*3 mm) 2 katmana ayrılarak sistem üzerindeki etkisi incelenmiştir. Tek katmanlı yapının mermi çıkışlarını Şekil 5.28 ve Şekil 5.29, iki katmanlı yapının mermi çıkışın Şekil 5.30 ve Şekil 5.31, üç katmanlı yapının mermi çıkışının Şekil 5.32 ve Şekil 5.33, iki katmanlı alüminyum oksitten merminin çıkışı ise Şekil 5.34 ve Şekil 5.35’de görebiliriz. Atış sonrası mermi hız çıkış değerlerini Şekilil 5.36’da görebiliriz.



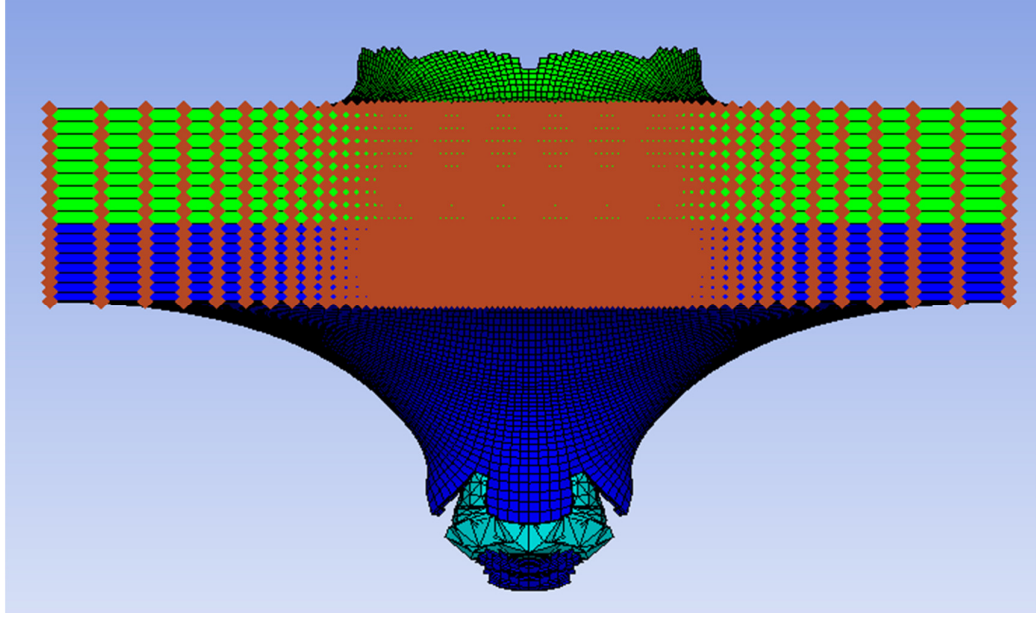
Şekil 5.28: Tek katmanlı Al2024-T4 zırh sisteminde mermi çıkış sonrası ön görüntüsü.



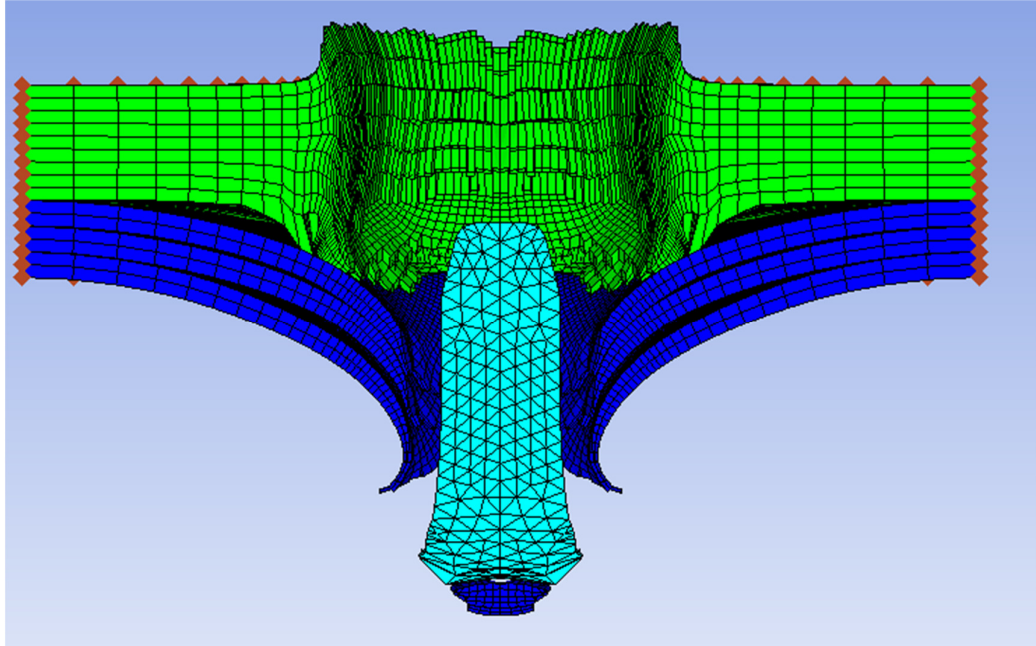
Şekil 5.29: Tek katmanlı Al2024-T4 zırh sisteminde mermi çıkış sonrası arka görüntüsü.



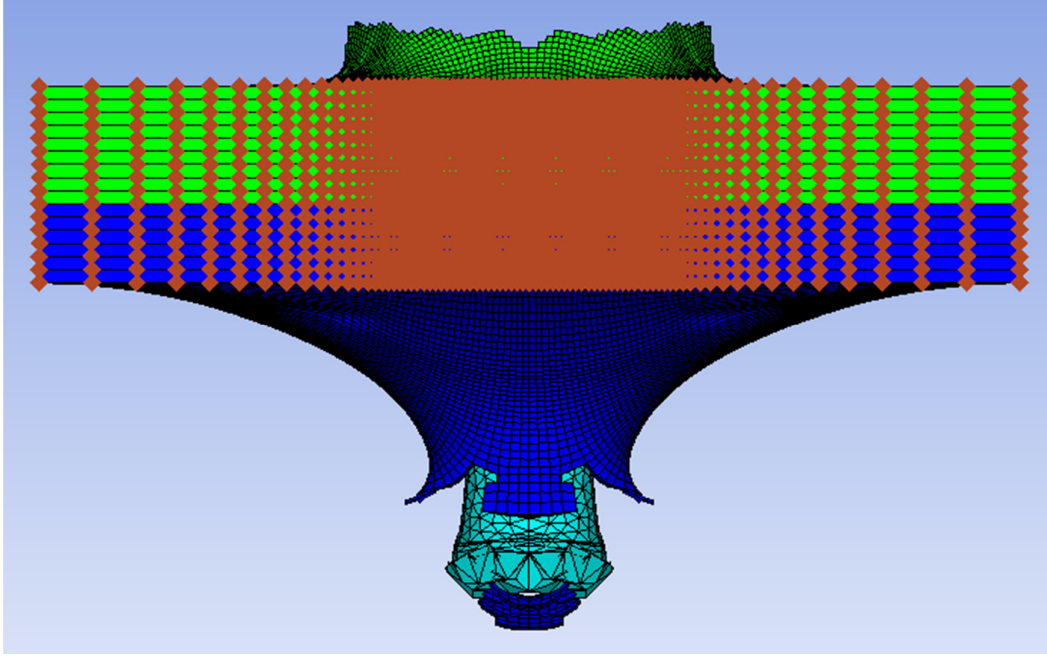
Şekil 5.30: İki katmanlı Al2024-T4 zırh sisteminde mermi çıkış sonrası ön görüntüsü.



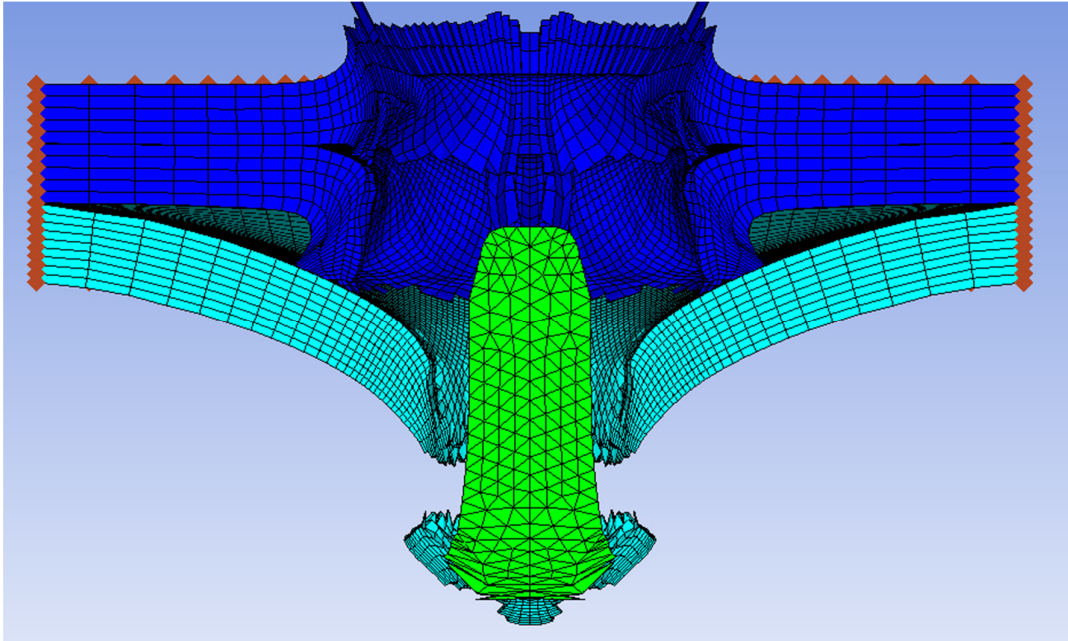
Şekil 5.31: İki katmanlı Al2024-T4 zırh sisteminde mermi çıkış sonrası arka görüntüsü.



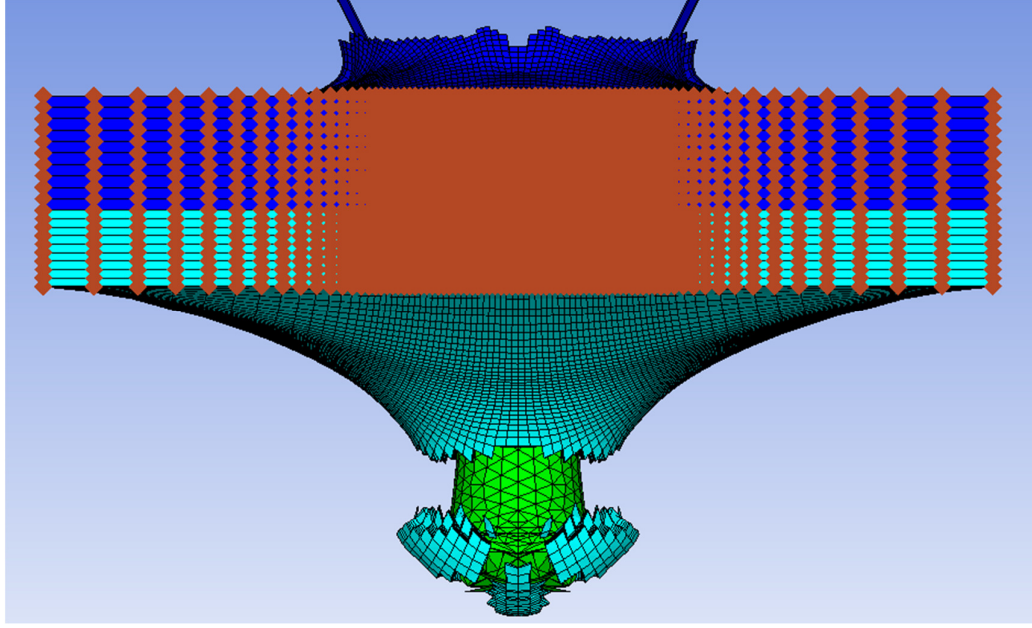
Şekil 5.32: Üç katmanlı Al2024-T4 zırh sisteminde mermi çıkış sonrası ön görüntüsü.



Şekil 5.33: Üç katmanlı Al2024-T4 zırh sisteminde mermi çıkış sonrası arka görüntüsü.



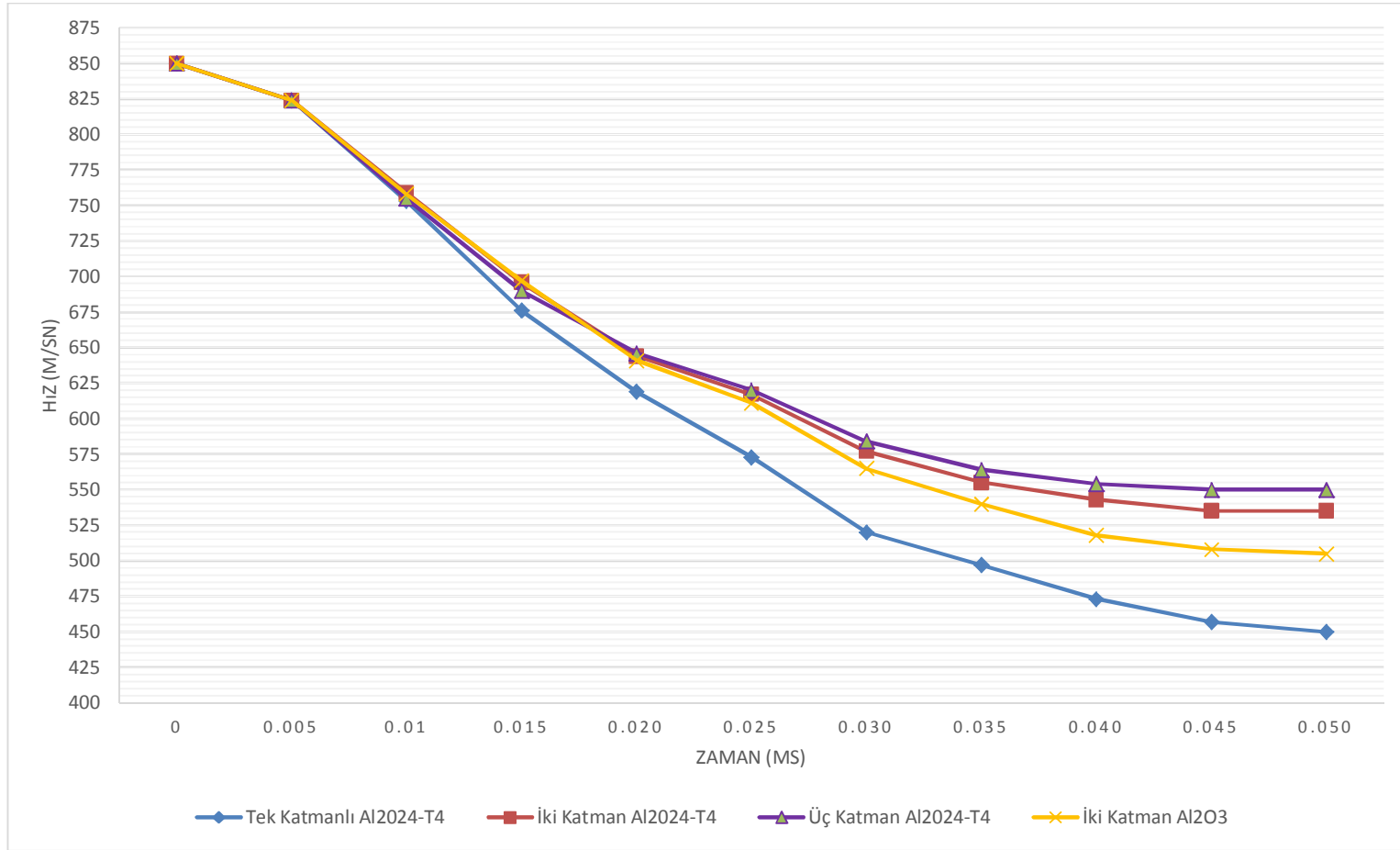
Şekil 5.34: İki katmanlı Al₂O₃ zırh sisteminde mermi çıkış sonrası ön görüntüsü.



Şekil 5.35: İki katmanlı Al_2O_3 zırh sisteminde mermi çıkış sonrası arka görüntüsü.

Şekil 5.36 nolu grafik incelendiği zaman tek katmanlı destek plakası kullanıldığı zaman merminin sistemden çıkış hızı 450 m/sn'dir. Eğer destek plakasını kalınlığını değiştirmeden iki katmandan oluşturursak mermi 535 m/sn ile sistemi terk ediyor. Ve katman sayısını üçe bölersek mermi sistemden 550 m/sn hızında sistemi terk ediyor. Bu durumda tek katmanlı yapıyla iki katmanlı yapıyı kıyasladığımız zaman tek katmanlı yapı mermi hızını %18 azaltmıştır. İki katmanlı yapı üç katmanlı yapıyla kıyaslandığı zaman iki katmanlı yapı mermi hızını %3 oranında azaltmıştır. Farklı bir durum olarak seramik katmanı 2'ye bölersek merminin sistemden çıkış hızı 505 m/sndir. Bu durumda tek katmandan oluşan sistem ile seramik katman sayısını 2'ye çıkardığımız sisteme göre %12 mermi hızını yavaşlatmıştır. Aynı şartlar altına seramik katman sayısının 2 olması ve destek plakasının katman sayısının 2 olması durumlarını kıyasladığımızda seramik katman sayısının 2 olduğu durumda mermi hızı %5 oranında yavaşlatmıştır. Çünkü mermi seramik ilk katmanı kırdıktan sonar çatlak ilerleyecek ve ikinci katmana geldiği zaman tekrar seramiği kırmak isteyecektir. Bu durumda mermiden daha fazla enerji sönmleyecektir.

Flores ve diğ [15] yapmış olduğu çalışma da tek katmanlı, iki katmanlı ve üç katmanlı aynı kalınlıktaki malzemelerin çalışmasını gerçekleştirmişlerdir. Yapılan çalışma sonuçlarında tek katmanlı yapının diğerlerine göre daha dirençli olduğunu belirlemişlerdir.

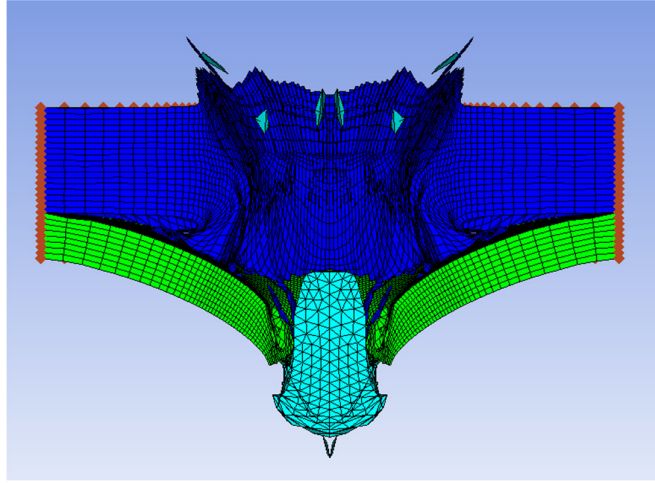


Şekil 5.36: Katman sayısına göre merminin sistemi terk ediş hızı.

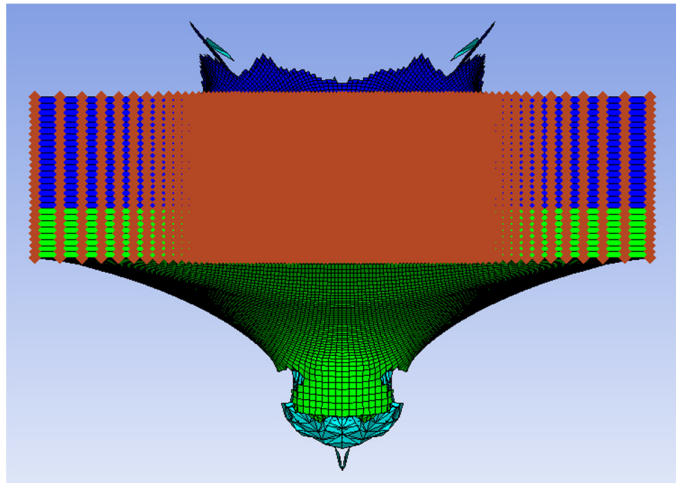
5.2.7.5. Optimum zırh kalınlığının belirlenmesi

Daha önceki analizlerde sisteme etki eden parametlere kısaca göz gezdirdikten sonra son bölüm olarak bu çalışmanın amacı olan optimum zırh kalınlığının belirlenmesine geçebiliriz. Bu çalışmada alüminyum destek levhasının kalınlıkları yoğunluğu seramiğe göre daha fazla olduğu için sabit tutulmuş ve seramik levhanın kalınlıkları 9, 10, 11 ve 12 mm olarak analizler gerçekleştirilmiştir.

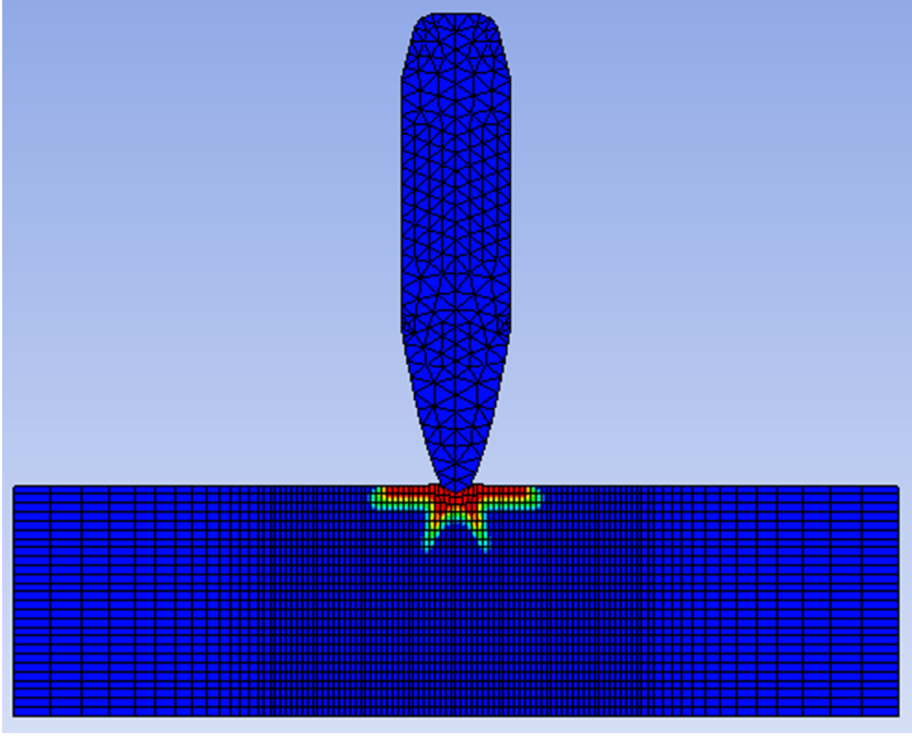
Şekil 5.37 ve şekil 5.38’de merminin zırhdan çıktıktan sonraki zırh görünümlerini, Şekil 5.39 ve şekil 5.40’da mermini 1 μ s ve 2 μ s sonra sistemde oluşturduğu gerilmeleri, şekil 5.41’de merminin seramik levhada oluşturduğu hasarı ve şekil 5.42’de alüminyum levhada oluşan eğilme durumunu görmekteyiz. Şekil 5.43’te mermi hızının zamana bağlı değişimini görmekteyiz.



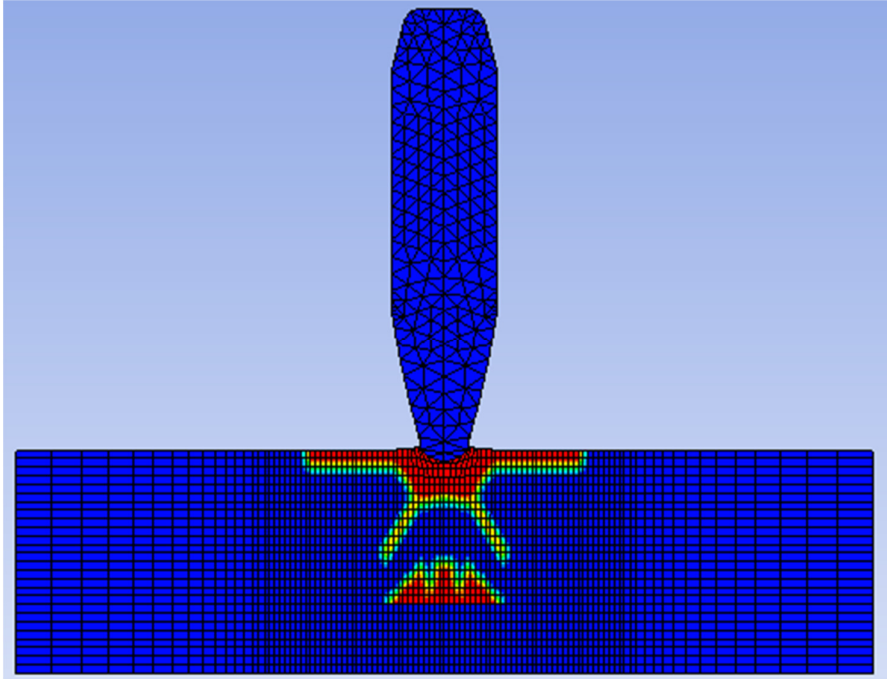
Şekil 5.37: 13 mm kalınlığındaki sistemde mermi çıkış sonrası ön görüntüsü.



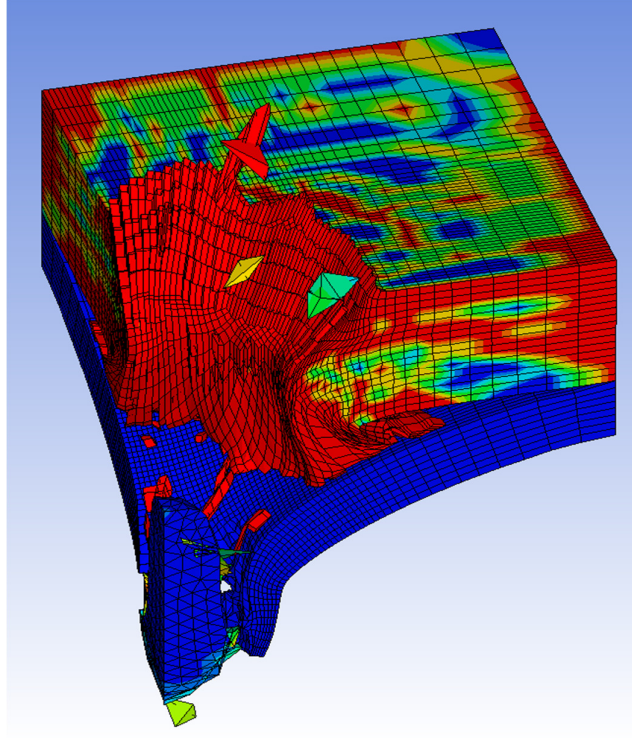
Şekil 5.38: 13 mm kalınlığındaki sistemde mermi çıkış sonrası arka görüntüsü.



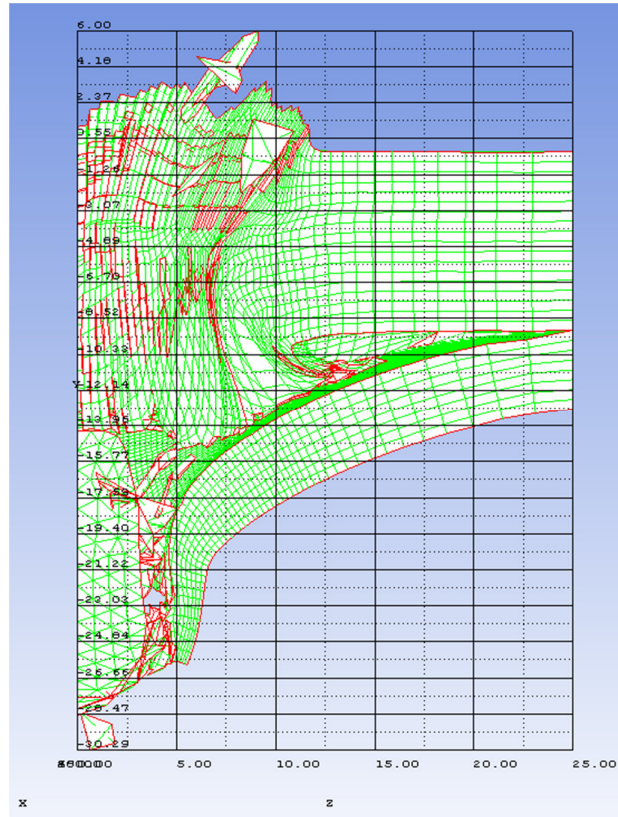
Şekil 5.39: 13 mm kalınlığındaki 1 μ s Sonrası oluşan gerilmeler.



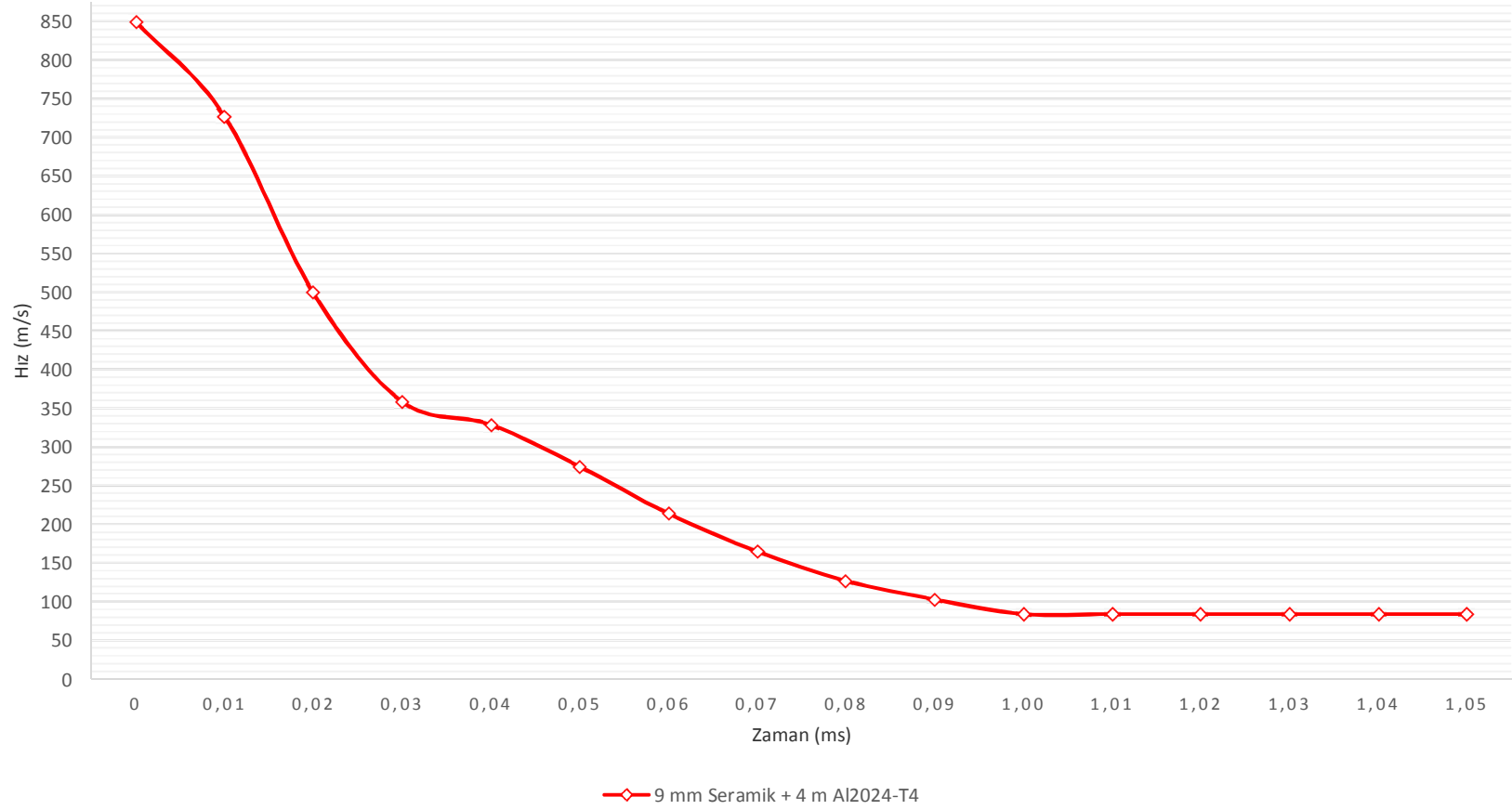
Şekil 5.40: 13 mm kalınlığındaki 2 μ s Sonrası oluşan gerilmeler.



Şekil 5.41: 13 mm kalınlığındaki levhada hasar durumu (izometrik görünüş).

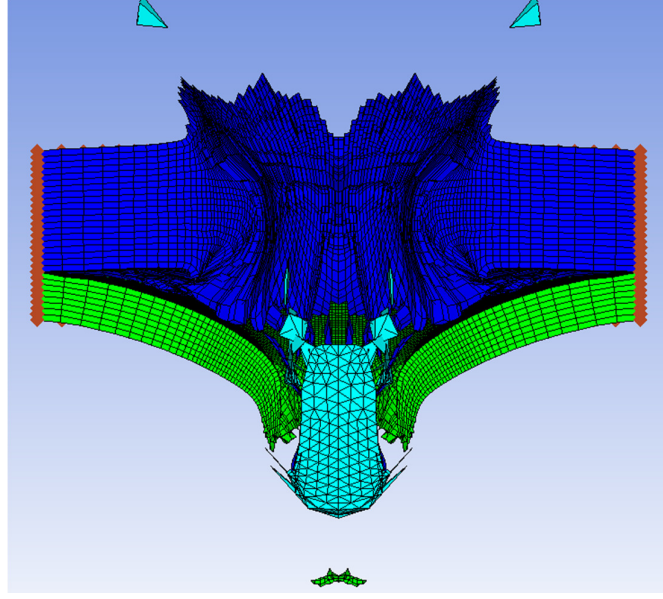


Şekil 5.42: 13 mm kalınlığındaki sistemde alüminyum levhanın esneme miktarı.

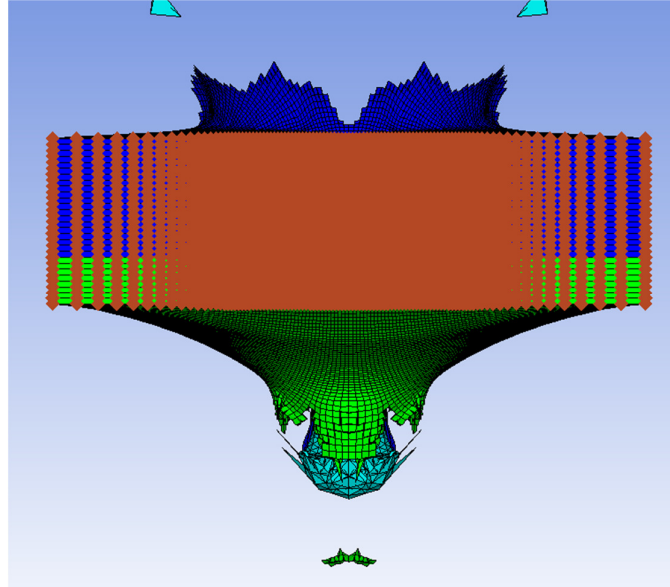


Şekil 5.43: 13 mm kalınlığındaki sistemde mermi hızının zamana bağlı değişimi.

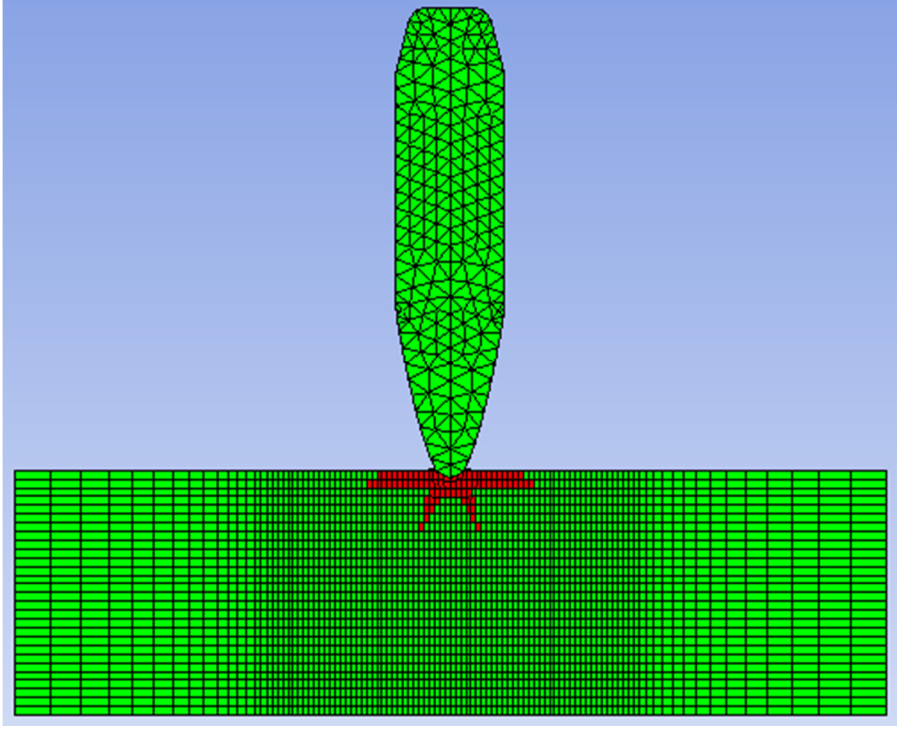
Şekil 5.44 ve şekil 5.45’de merminin zırhdan çıktıktan sonraki zırh görünümlerini, Şekil 5.46 ve şekil 5.47’de mermini 1 μ s ve 2 μ s sonra sistemde oluşturduğu gerilmeleri, şekil 5.48’de merminin seramik levhada oluşturduğu hasarı ve şekil 5.49’da alüminyum levhada oluşan eğilme durumunu görmekteyiz. Şekil 5.50’de mermi hızının zamana bağlı değişimini görmekteyiz.



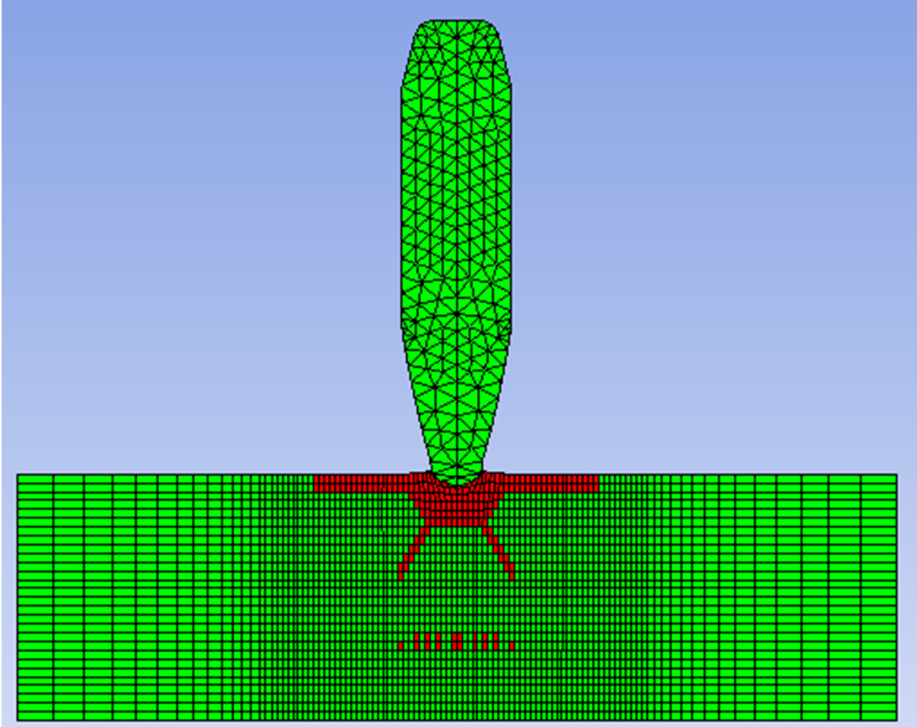
Şekil 5.44: 14 mm kalınlığındaki sistemde mermi çıkış sonrası ön görüntüsü.



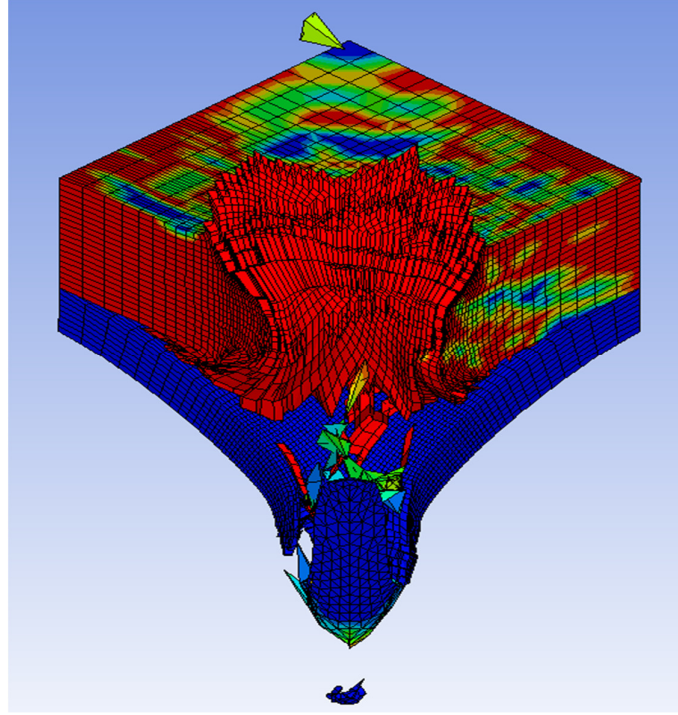
Şekil 5.45: 14 mm kalınlığındaki sistemde mermi çıkış sonrası arka görüntüsü.



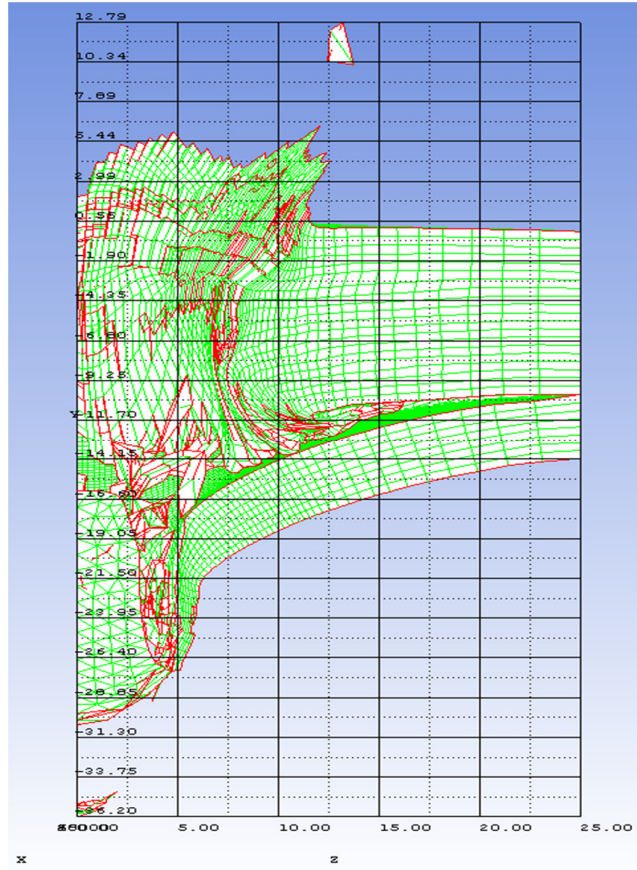
Şekil 5.46: 14 mm kalınlığındaki 1 μ s Sonrası oluşan gerilmeler.



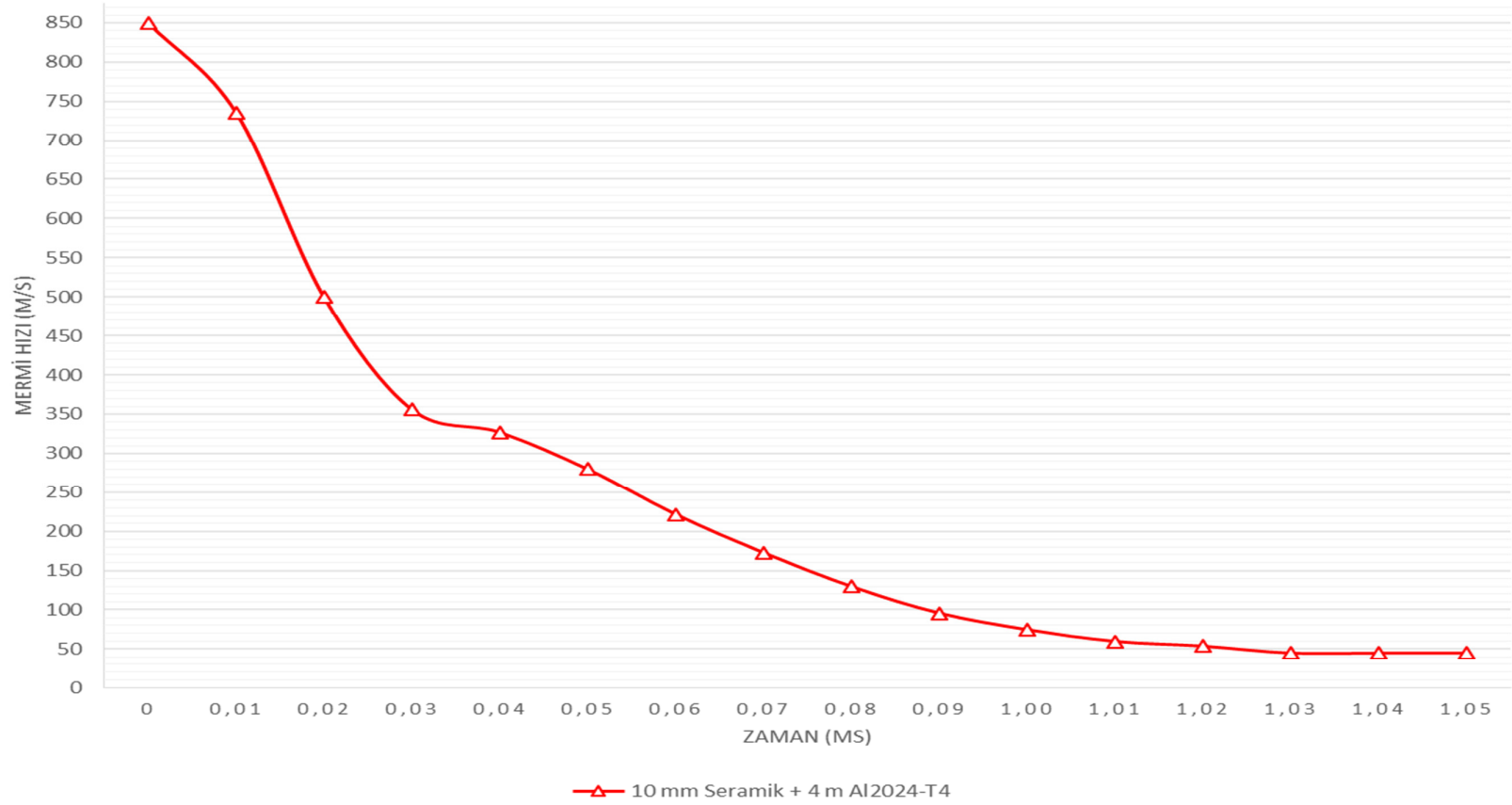
Şekil 5.47: 14 mm kalınlığındaki 2 μ s Sonrası oluşan gerilmeler.



Şekil 5.48: 14 mm kalınlığındaki levhada hasar durumu (izometrik görünüş).

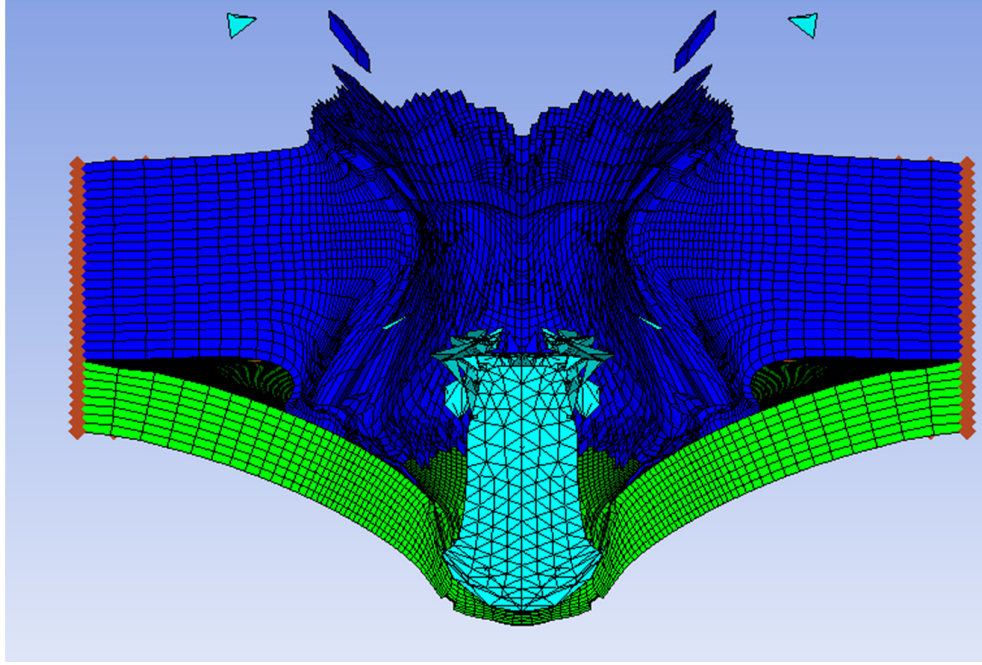


Şekil 5.49: 14 mm kalınlığındaki sistemde alüminyum levhanın esneme miktarı.

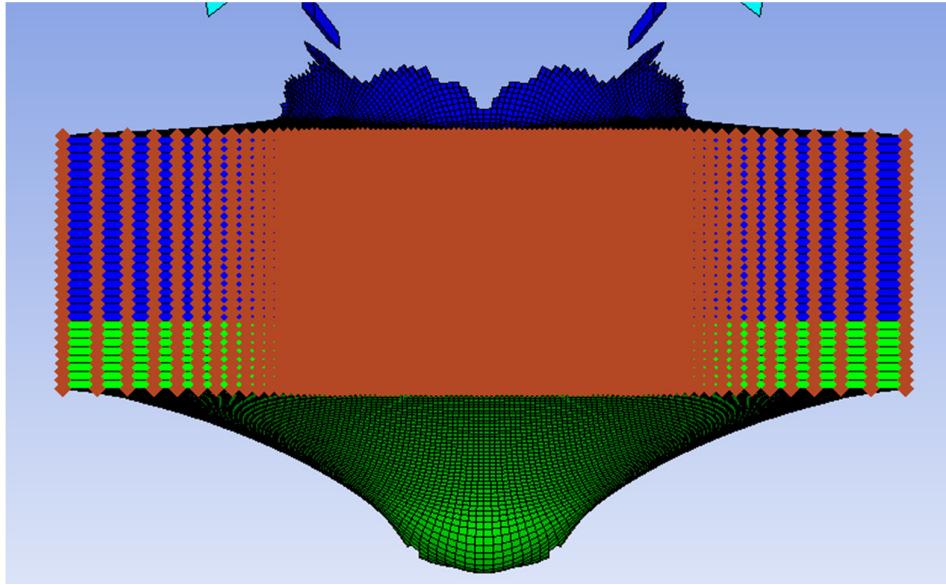


Şekil 5.50: 14 mm kalınlığındaki sistemde mermi hızının zamana bağlı değişimi.

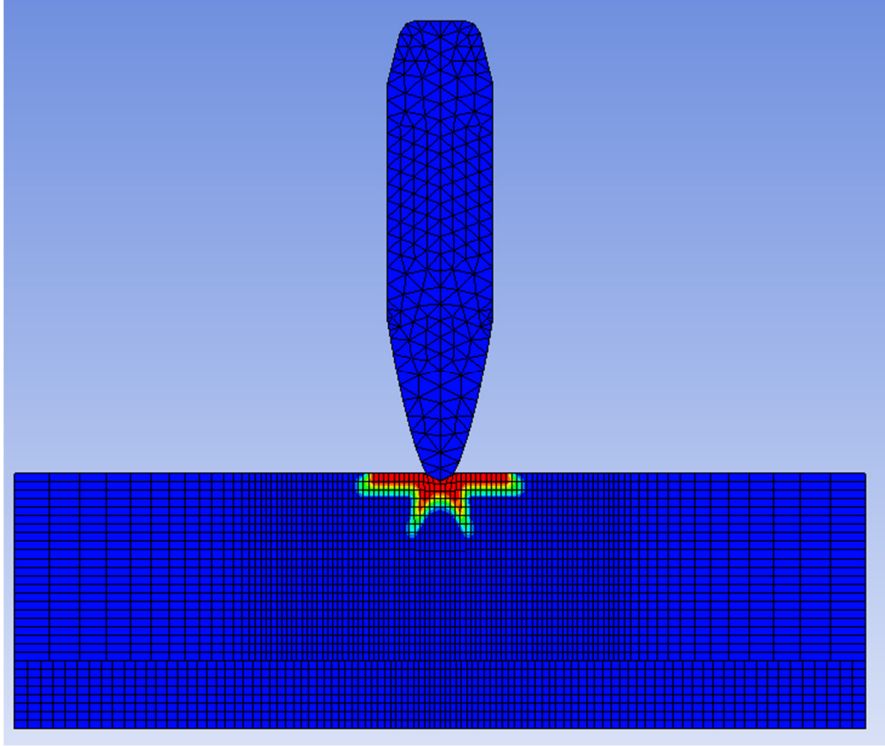
Şekil 5.51 ve şekil 5.52’de merminin zırhdan çıktıktan sonraki zırh görünümlerini, Şekil 5.53 ve şekil 5.54’de mermini 1 μ s ve 2 μ s sonra sistemde oluşturduğu gerilmeleri, şekil 5.55’de merminin seramik levhada oluşturduğu hasarı ve şekil 5.56’da alüminyum levhada oluşan eğilme durumunu görmekteyiz. Şekil 5.57’de mermi hızının zamana bağlı değişimini görmekteyiz.



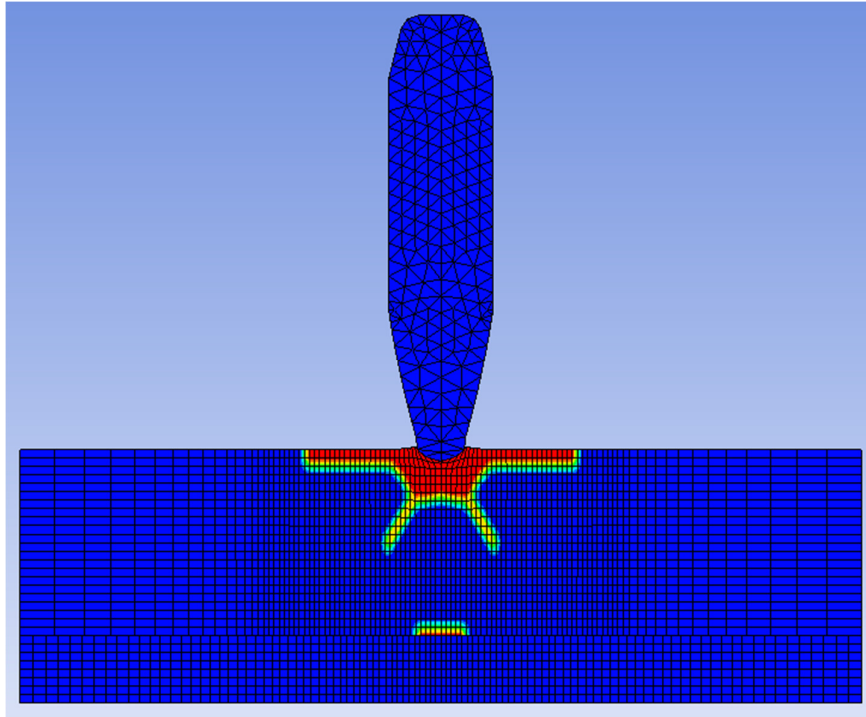
Şekil 5.51: 15 mm’lik sistemde mermi çıkış sonrası ön görüntüsü.



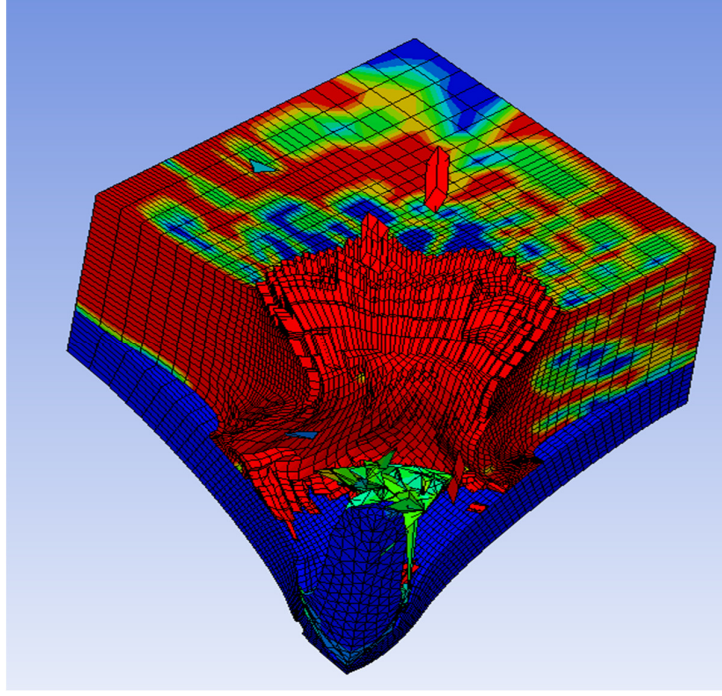
Şekil 5.52: 15 mm kalınlığındaki sistemde mermi çıkış sonrası arka görüntüsü.



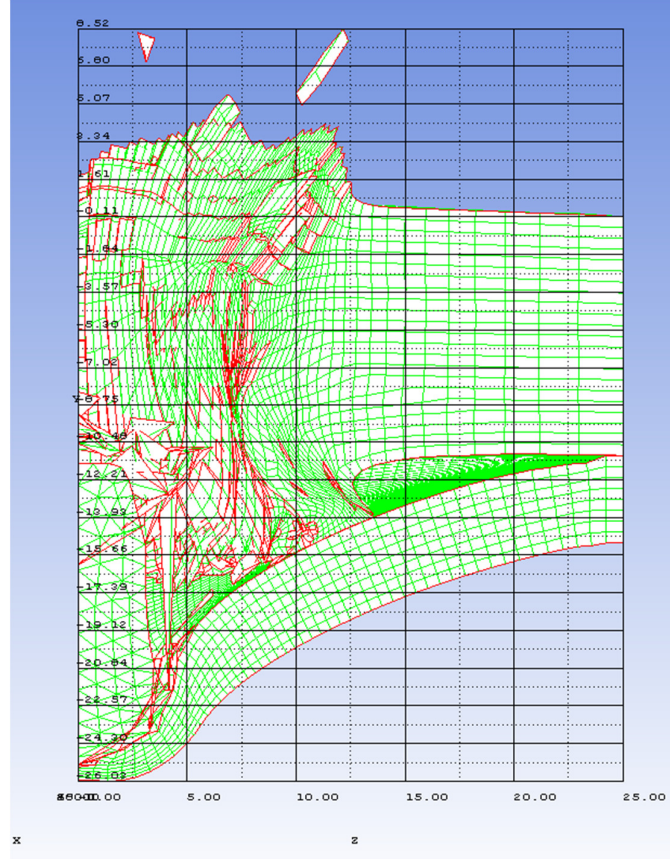
Şekil 5.53: 15 mm kalınlığındaki 1 μ s Sonrası oluşan gerilmeler.



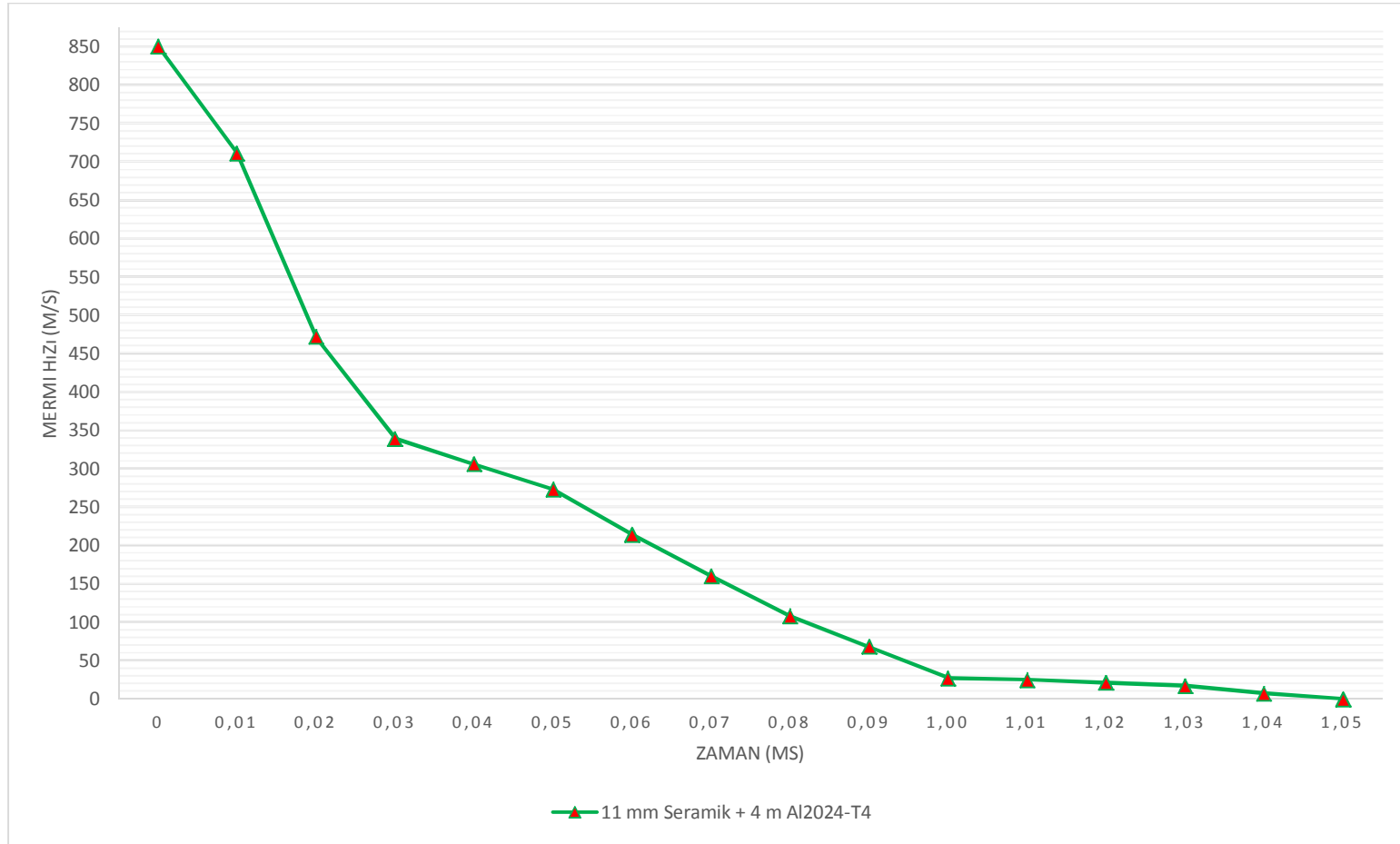
Şekil 5.54: 15 mm kalınlığındaki 2 μ s Sonrası oluşan gerilmeler.



Şekil 5.55: 15 mm kalınlığındaki levhada hasar durumu (izometrik görünüş).

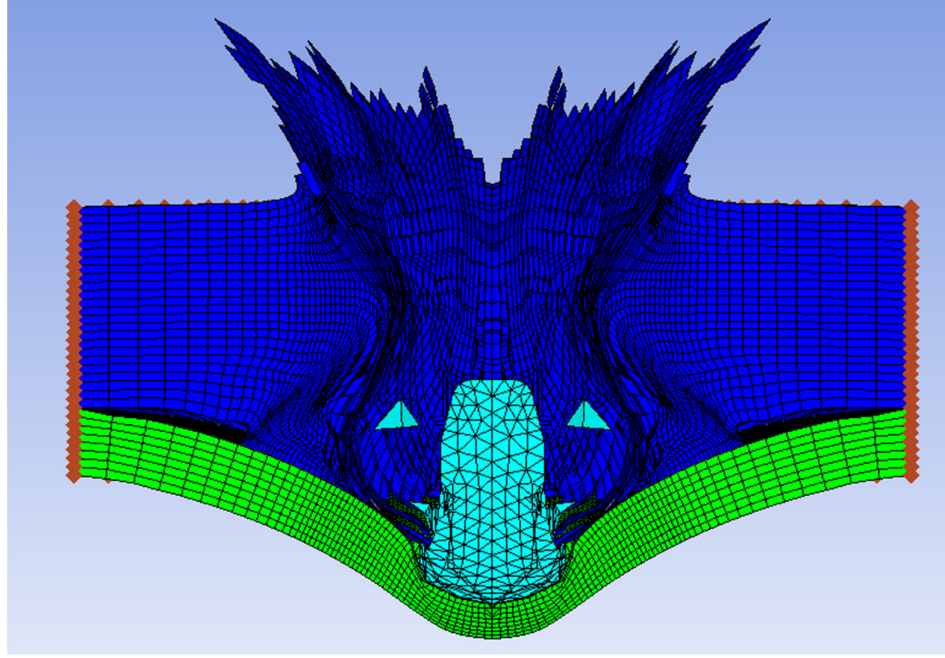


Şekil 5.56: 15 mm kalınlığındaki sistemde alüminyum levhanın esneme miktarı.

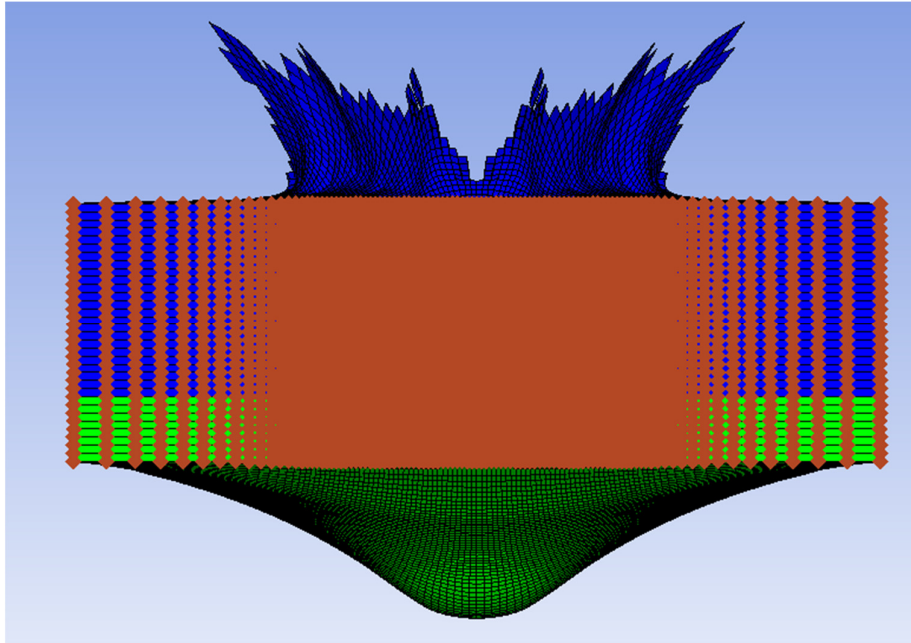


Şekil 5.57: 15 mm kalınlığındaki sistemde mermi hızının zamana bağlı değişimi.

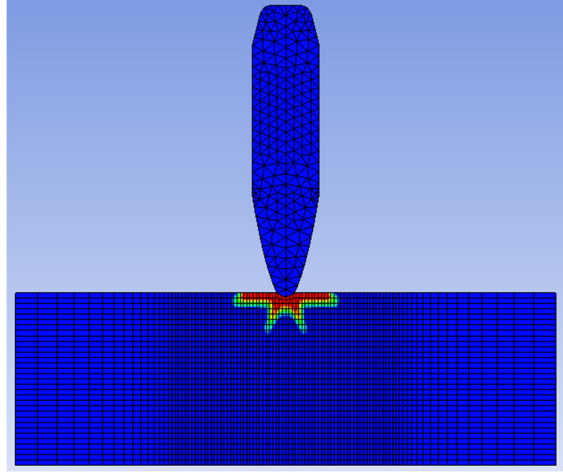
Şekil 5.58 ve şekil 5.59’da merminin zırhdan çıktıktan sonraki zırh görünümlerini, Şekil 5.60, şekil 5.61 ve şekil 5.62’de mermini 1 μ s, 2 μ s ve 3 μ s sonra sistemde oluşturduğu gerilmeleri, şekil 5.63’de merminin seramik levhada oluşturduğu hasarı ve şekil 5.64’de alüminyum levhada oluşan eğilme durumunu görmekteyiz. Şekil 5.65’de mermi hızının zamana bağlı değişimini görmekteyiz.



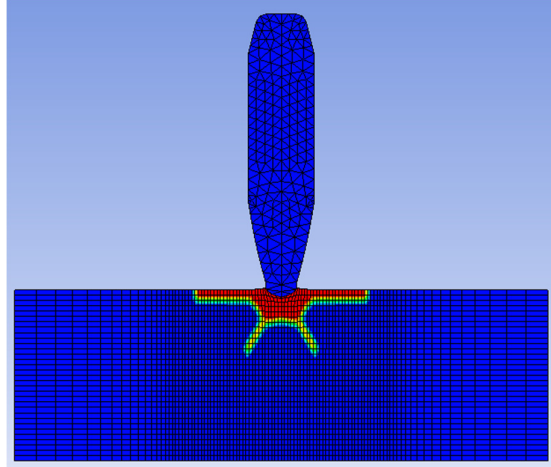
Şekil 5.58: 16 mm kalınlığındaki sistemde mermi çıkış sonrası ön görüntüsü.



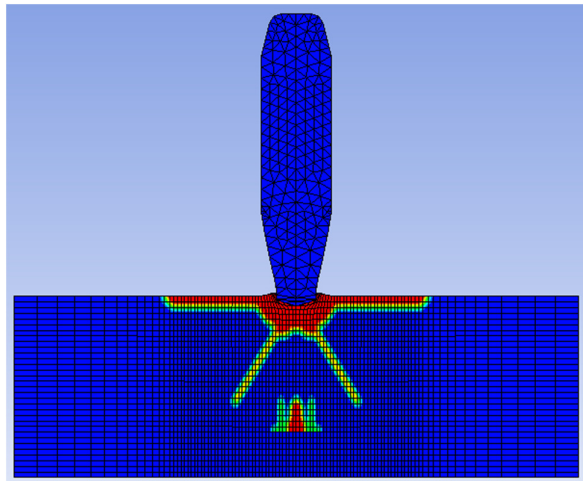
Şekil 5.59: 16 mm kalınlığındaki sistemde mermi çıkış sonrası ön görüntüsü.



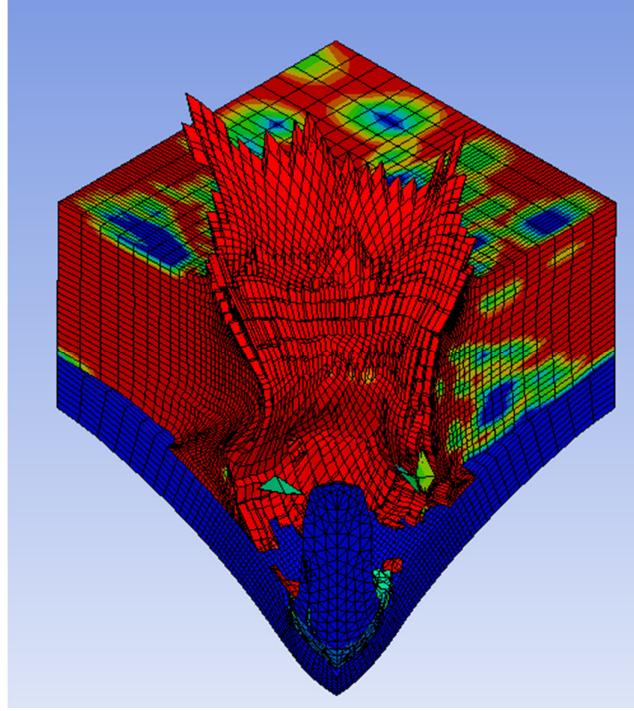
Şekil 5.60: 16 mm kalınlığındaki 1 μ s Sonrası oluşan gerilmeler.



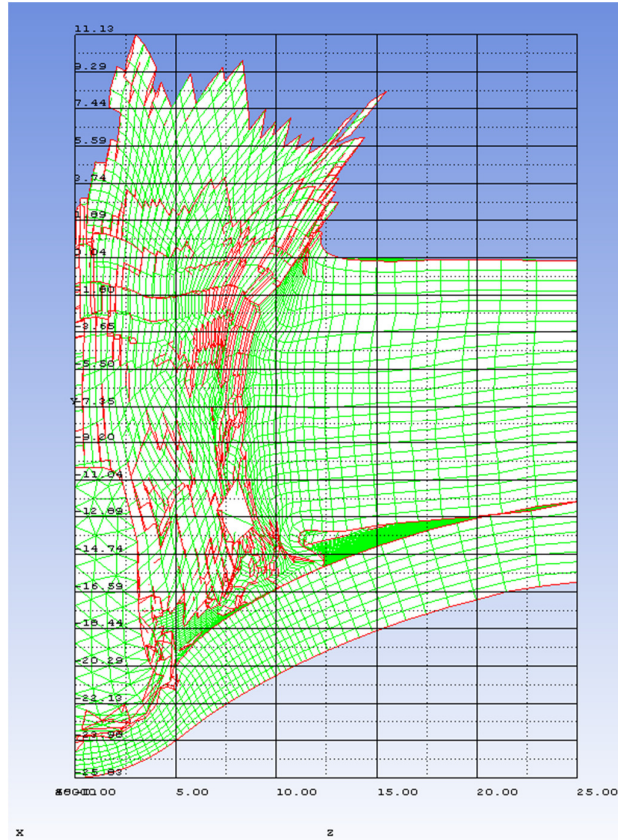
Şekil 5.61: 16 mm kalınlığındaki 2 μ s Sonrası oluşan gerilmeler.



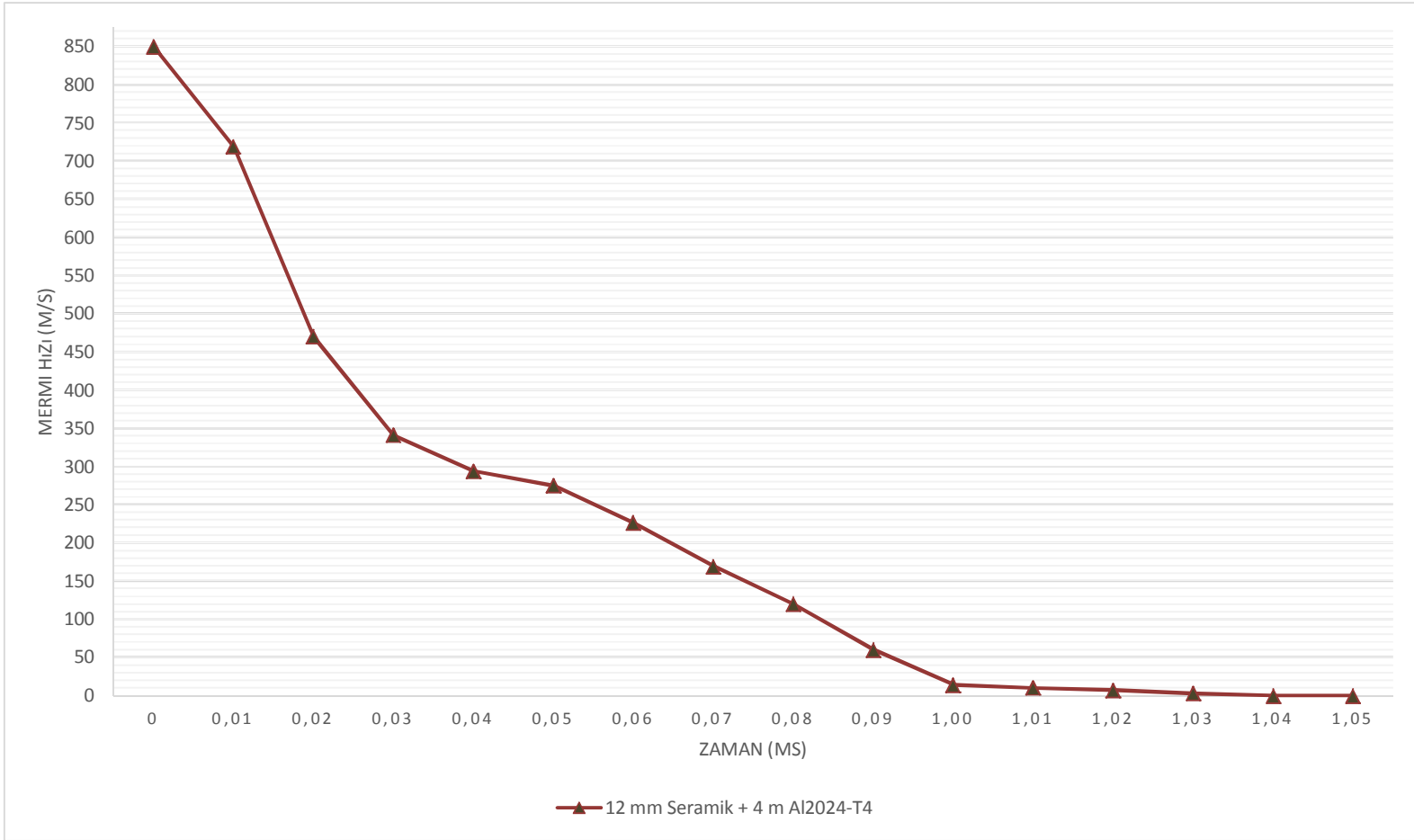
Şekil 5.62: 16 mm kalınlığındaki 3 μ s Sonrası oluşan gerilmeler.



Şekil 5.63: 16 mm kalınlığındaki levhada hasar durumu (izometrik görünüş).



Şekil 5.64: 16 mm kalınlığındaki sistemde alüminyum levhanın esneme miktarı.



Şekil 5.65: 16 mm kalınlığındaki sistemde mermi hızının zamana bağlı değişimi.

5.2.8 Sonuçlar

Bu çalışmada alüminyum oksit ön levha ve T4 kondisyonuna kadar ısıı işlem görmüş alüminyum blok kullanılmıştır. Bu çalışmanın amacı seramik/metal birleşiminden oluşan sistemin optimum kalınlık oranını bulmaktır. Bu çalışmada alüminyum blok sabit tutulmuş seramik levhanın kalınlığı 9 mm, 10 mm, 11 mm ve 12 mm olarak ayarlanmıştır.

Seramik malzemeler oldukça kırılğan malzemelerdir. Bu yüzden darbe etkisi altında yüksek dayanım göstermelerine rağmen çabuk kırılırlar. Şekil 5.39, Şekil 5.46, Şekil 5.53 ve Şekil 5.60'da görüldüğü gibi mermi seramik malzemeye temas ettiğı anda seramik malzeme hasar görmüştür. Merminin seramik malzemeye temas edip ilerlemeye başladığı andan itibaren seramik levha içerisinde şok dalgaları oluşmuş ve destek plakasına doğru bu dalgalar ilerlemiştir. Destek plakasına geldikten sonra plaka bu dalgalara tepki göstermiştir ve ters yönde çekme gerilmeleri meydana gelmiştir. 9, 10 ve 11 mm kalınlıklarındaki sistemlerde arka kısımdan gelen çekme gerilmelerinin etkisi 1-2 µs arasında olduğunu grafiklerden görmek mümkündür. Kalınlığın artması ile bu dalgaların etkisinin yoğunluğunun azaldığını grafiklerden görmek mümkündür. Fakat 12 mm kalınlığındaki seramik levhada bu çekme gerilmelerinin etkisini 2-3 µs arasında oluştuğunu söylemek mümkündür.

Mermiyi inceleyecek olursak mermi de AUTODYNA programının kütüphanesinde elik 4340 malzemesi alınarak kullanılmıştır. Mermi seramik levhaya nüfüz etmeye başladığı andan itibaren sert özelliğe sahip levhanın etkisiyle hızı azalmaya başlamıştır. Burada seramik levha merminin kinetik enerjisini azalttığını söyleyebiliriz. Ayrıca sert olması sebebiyle seramik levha merminin kinetik enerjisini absorbe ederken merminde bir kısmını parçalamış ve sivri olan mermi ucu kör şekline gelmiştir.

Analiz sonuçlarında 11 mm seramik levha + 4 mm Al2024-T4 malzeme ve 12 mm seramik levha + 4 mm Al2024-T4 malzemedan oluşan sistem mermiyi durdurmuştur. Fakat grafikler incelendiğı zaman 11 mm seramik levha + 4 mm Al2024-T4 malzemedan oluşan sistemde alüminyum malzemede parçalanmalar olduğunu söyleyebiliriz. Bu durumda her ne kadar sistem mermiyi durdursa da güvenlik açısından uygun olmadığını söylemek mümkündür.

Fakat 12 mm seramik levha + 4 mm destek plakasından oluşan sistemde mermer sadece 2 mm destek plakasına nüfuz ettikten sonra durduğunu söylemek mümkündür. Bu sonuca göre seramik levha / alüminyum levha oranı 3 olarak seçildiği zaman sistemin mermeri durdurduğunu söyleriz.

5.2.9 Öneriler

Nümerik olarak gerçekleştirilen bu çalışmada aşağıdaki ek çalışmalarda yapılarak geliştirilebilir:

- Bu çalışmada ön levha olarak alüminyum oksit kullanılmıştır. Bu malzeme yerine sertliği daha yüksek olan Bor Karbür kullanılarak elde edilen sonuçlar karşılaştırılabilir.
- Katman sayısını etkisini incelediğimizde yoğunluğa bağlı olarak katman sayısının artması malzeme dayanımı düşürdüğünü görmüştük. Bu çalışmada alüminyum blok katman sayısı değiştirilip çalışma gerçekleştirilmiştir. Aynı durum seramik levha içinde gerçekleştirilip sonuçlar karşılaştırılabilir.
- Destek plakası olarak T4 sıcaklığına kadar ısıtılmış alüminyum blok kullanılmıştır. Destek plakası değiştirilerek farklı malzemeler kullanılarak sonuçlar karşılaştırılabilir.
- Analizler AUTODYNA programı kullanılarak yapılmıştır. Günümüzde bu alanda kullanılan çok fazla ticari yazılım vardır. Özellikle LS-DYNA programı kullanılarak analizler tekrar gerçekleştirilebilir.
- Bu çalışma nümerik olarak yapılmıştır. Deneysel olarak çalışma yapıp sonuçlar karşılaştırılabilir.
- Malzeme modellemesi için Lagrange çözücü kullanılmıştır. Son zamanlarda özellikle kırılabilir malzemeler için kullanılan yeni bir malzeme çözücüsü kullanılmaya başlanmıştır. Seramik malzeme SPH modeli kullanılarak tasarlanabilir.
- Analiz zaman tasarrufu elde etmek amacıyla y ve z eksenlerine simetri alınarak yapılmıştır. Tam model oluşturularak analizler gerçekleştirilebilir.

KAYNAKLAR

- [1] **Tasdemirci, A., Tunusoglu, G. ve Güden, M.** (2012). The effect of the interlayer on the ballistic performance of ceramic/composite armors: experimental and numerical study, *International Journal of Impact Engineering*, **44**, 1–9.
- [2] **Fawaz, Z., Zheng, W. ve Behdinan, K.** (2004). Numerical simulation of normal and oblique ballistic impact on ceramic composite, *Composite Structure*, **63**, 387–395.
- [3] **Jena, P. K., Mishra, B., Kumar, K. S. ve Bhat, T. B.** (2010). An experimental study on the ballistic impact behavior of some metallic armour materials against 7.62 mm deformable projectile, *Materials and Design*, **31**, 3308–3316.
- [4] **Übeyli, M., Yıldırım, R. O. ve Ögel, B.** (2007). On the comparison of the ballistic performance of steel and laminated composite armors, *Materials and Design*, **28**, 1257–1262.
- [5] **Übeyli, M., Yıldırım, R. O. ve Ögel, B.** (2008). Investigation on the ballistic behavior of Al₂O₃/Al2024 laminated composites, *Journal of Materials Processing Technology*, **196**, 356–364.
- [6] **Vural, M., Erim, Z., Konduk, B. A. ve Ucisik, A. H.** (2008). Ballistic performance of alumina ceramic armors , *Ceramic Armor Materials by Design*, **134**, 103–110.
- [7] **Medvedovski, E.** (2008). Armor alumina ceramics, *Ceramic Armor Materials by Design*, **134**, 91–101.
- [8] **Beritan, K.** (2011). Polimer matrisli seramik katkılı zırh malzeme üretimi, *Yüksek Lisans Tezi*, Makina Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Malzeme ve İmalat Yüksek Lisans Programı.
- [9] **Sülük, A. ve Yıldız, C.** (2011). Güvenlik güçlerini korumaya yönelik zırh tasarımı, imalatı ve analizi, *Bitirme Tasarım Projesi*, Makina Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, İmalat Mühendisliği Lisans Programı.
- [10] **Tellioğlu, Ş. K.** (2007). Seramik zırh plakası üretimi, *Yüksek Lisans Tezi*, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Anabilim Dalı.
- [11] **Übeyli, M. ve Ögel, B.** (2002). Alumina/aluminyum katmanlı kompozitlerin balistik performanslarının incelenmesi, *Savunma Teknolojileri Kongresi*, ODTÜ, ANKARA
- [12] **Gonçalves, D. P., Melo, F. C. L., Klein, A. N. ve Al-Qureshi, H. A.** (2004). Analysis and investigation of ballistic impact on ceramic/metal composite armour, *International Journal of Machine Tool & Manufacture*, **44**, 307–316.

- [13] **Özşahin, E. ve Tolun, S.** (2010). Yüzey kaplaması ve destek katman ilavesinin alüminyum levhaların balistik performansına etkileri, *Havacılık ve Uzay Teknolojileri Dergisi*, Cilt 4, Sayı 4, 41-50.
- [14] **Rosenberg, Z. ve Dekel, E.** (2012). Terminal ballistic, *Springer*.
- [15] **Flores-Johnson, E. A., Saleh, M. ve Edwards, L.** (2011). Ballistic performance of multi-layered metallic plates impacted by a 7.62 mm APM2 projectile, *International Journal of Impact Engineering*, **38**, 1022-1032.
- [16] **Zaera, R.** (2011). Ballistic impact on polymer matrix composites, composite armor, personel armor, *Departman of Continuum Mechanics and Solid Mechanics*, University III of Madrid.
- [17] **Madhu, V., Ramanjaneyulu, K., Bhat, T. B. ve Gupta, N. K.** (2005). An experimental study of penetration resistance of ceramic armour subjected to projectile impact, *International Journal of Impact Engineering*, **32**, 337-350.
- [18] **Hazell, P. J., Roberson, C. J., ve Moutinho, M.** (2008). The design of mosaic armour: The influence of tile size on ballistic performance, *Material and Design*, **29**, 1497-1503.
- [19] **Borvik, T., Olovsson, L., Dey, S. ve Langseth, M.** (2011). Normal and oblique impact of small arms bullets on AA6082-T4 aluminum protective plates, *International Journal of Impact Engineering*, **38**, 577-589.
- [20] **Roeder, B. A. ve Sun, C. T.** (2001). Dynamic penetration of alumina/aluminum laminates: experiments and modelling, *International Journal of Impact Engineering*, **25**, 169-185.
- [21] **Demir, T., Übeyli, M. ve Yıldırım, R. O.** (2008). Investigation on the ballistic impact behavior of various alloys against 7.62 mm armor piercing projectile, *Materials and Design*, **29**, 2009-2016.
- [22] **Lee, M. ve Yoo, Y. H.** (2001). Analysis of ceramic/metal armour systems, *International Journal of Impact Engineering*, **25**, 819-829.
- [23] **Borvik, T., Clausen, A. H., Hopperstad, O. S. ve Langseth, M.** (2004). Perforation of AA5083-H116 aluminum plates with conical- nose steel projectiles—experimental study, *International Journal of Impact Engineering*, **30**, 367-384.
- [24] **Warren, T. H., Poormon, K. L.** (2001). Penetration of 6061-T6511 aluminum targets by ogive-nosed VAR 4340 steel projectiles at oblique angles: experiments and simulations, *International Journal of Impact Engineering*, **25**, 993-1022.
- [25] **Orphal, D. L. ve Franzen, R. R.** (1997). Penetration of silicon carbide targets by tungsten long rods at impact velocities from 1.5 to 4.6 km/s, *International Journal of Impact Engineering*, **19**, 1-13.
- [26] **Borvik, T., Hopperstad, O. S. ve Pedersen, K. O.** (2010). Quasi-brittle fracture during structural impact of AA7075-T651 aluminum plate, *International Journal of Impact Engineering*, **37**, 537-551.

- [27] **Liden, E. Andersson, O. ve Lundberg, B.** (2011). Deformation and fracture of a long rod projectile induced by an oblique moving plate: experimental tests, *International Journal of Impact Engineering*, **38**, 989-1000.
- [28] **Gupta, N. K. ve Madhu, V.** (1997). An experimental study of normal and oblique impact of hard-core projectile single and layered plates, *International Journal of Impact Engineering*, **19**, 395-414.
- [29] **Sherman, D. ve Ben-Shushan, T.** (1998). Quasi-static impact damage in confined ceramic tiles , *International Journal of Impact Engineering*, **21**, 245-265.
- [30] **Özşahin, E. ve Tolun, S.** (2010). On the comparison of the ballistic response of coated aluminum plates, *Materials and Design*, **31**, 3188-3193.
- [31] **Quan, X., Clegg, R. A, Cowler, M. S., Birnbaum, N. K. ve Hayhurst, C. J.** (2006). Numerical simulation of long rod impacting silicon carbide targets using JH-1 model, *International Journal of Impact Engineering*, **33**, 634-644.
- [32] **Galanov, B. A., Kartuzov, V. V. ve Ivanov, S. M.** (2008). Numerical-Analytical model of penetration of long rod elastically deformable projectiles into semi-infinite targets , *International Journal of Impact Engineering*, **35**, 634-644.
- [33] **Lee, M., Kim, E. Y. ve Yoo, Y. H.** (2008). Simulation of high speed impact into ceramic composite systems using cohesive-law fracture model, *International Journal of Impact Engineering*, **35**, 1636-1641.
- [34] **Iqbal, M. A., Chakrabarti, A., Beniwal, S. ve Gupta, N. K.** (2010). 3D numerical simulation of sharp nosed projectile impact on ductile targets, *International Journal of Impact Engineering*, **37**, 185-195.
- [35] **Zaera, R., Sanchez-Saez, S., Perez-Castellanos, J. L. ve Navarro, C.** (2000). Modelling of the adhesive layer in mixed ceramic/metal armors subjected to impact, *Composites: Part A*, **31**, 823-833.
- [36] **Sharma, A. C.** (2009). Simulation of hypervelocity impact on monolithic and spaced target, *DRDO Science Spectrum*, 37-42.
- [37] **Huang, F. L. ve Zhang, L. S.** (2007). Investigation on ballistic performance of armor ceramics against long-rod penetration, *The Minerals, Metals & Materials Society and ASM International*, 11661-007-9281-8.
- [38] **Fawaz, Z., Behdinin, K. ve Xu, Y** (2006). Optimum design of two component composite armours against high-speed impact, *Composite Structures*, **73**, 253-262.
- [39] **Shokrieh, M. M. ve Javadpour, G. H.** (2008). Penetration analysis of projectile in ceramic composite armour, *Composite Structures*, **82**, 269-276.
- [40] **Tan, V. B. C. ve Khoo, K. J. L.** (2004). Perforation of flexible laminates by projectiles of different geometry, *International Journal of Impact Engineering*, **31**, 793-810.

- [41] **Lopez-Puente, J., Arias, A., Zaera, R. ve Navarro, C.** (2005). The effect of the thickness of the adhesive layer on the ballistic limit of ceramic/metal armours. An experimental and numerical study, *International Journal of Impact Engineering*, **32**, 321-336.
- [42] **Demir, T., Übeyli, M. ve Yıldırım, R. O.** (2009). Effect of hardness on the ballistic impact behavior of high strength steels against 7.62 mm armor piercing projectiles, *Journal of Materials Engineering and Performance*, **18**, 145-153.
- [43] **Zukas J.A.** (1980). Impact dynamics: theory and experiment, *Technical Report*.
- [44] **Belytschko T., Liu W. K. ve Moran B.** (2000). Nonlinear finite elements for continua and structures, *Wiley*
- [45] **Abrate, S.** (2011). Impact Enginnering of Composite Structure, *SpringerWienNewyork*
- [46] **Başaran, B.** (2007). Computational Analysis of Advanced Composite Armor System, *Yüksek lisans tezi*, Doğa ve Uygulamalı Bilimler Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü.
- [47] **Hiermaier, S.** (2008). Structures Under Crash and Impact Continuum Mechanivs, Discretization and Experimental Characterization, *Springer*.
- [48] **Holmquist, T. J. ve Johnson, G.R.** (2008). Response of Boron Carbide Subjected to High-Velocity Impact, *International Journal of Impact Engineering*, **35**, 742-752.
- [49] **Cronin, D. S., Bui, K., McIntosh, G. ve Berstad, T.** (2003). Implementation and Validation of Johnson-Holmquist (JH) Ceramic Material Model in LS-DYNA, *4th European LS-DYNA Users Conference*, **D-1**, 47-60.
- [50] **Johnson, G. R.** (2011). Numerical algorithms and material models for high-velocity impact computations, *International Journal of Impact Engineering*, **38**, 456-472.
- [51] **Hazell, P. J., Appleby-Thomas, G.J., Philbey, G. ve Tolman, B.** (2013). The effect of gilding jacket material on the penetration mechanics of a 7.62 mm armour-piercing projectile, *International Journal of Impact Engineering*, **54**, 11-18.
- [52] **Bürger, D., Rocha de Faria, A., de Almeida, S. F. M., de Melo, F. C: L. ve Donadon, M. C.** (2012). Ballistic impact simulation of an armour-piercing projectile on hybridceramic/fiber reinforced composite armours, *International Journal of Impact Engineering*, **43**, 63-67.
- [53] **Holmquist, T. J. ve Johnson, G. R.** (2005). Modeling prestressed ceramic and its effect on ballistic performance, *International Journal of Impact Engineering*, **31**, 113–127.
- [54] **Übeyli, M., Yıldırım, R. O. ve Ögel, B.** (2008). Investigation on the ballistic behavior of Al₂O₃/Al₂O₃ laminated composites, *journal of materials processing technology*, **196**, 356–364.
- [55] **Material Model Properties**, *Autodyna Library*

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Hüseyin Ekrem DEMİRTAŞ

Doğum Yeri ve Tarihi: ÇANAKKALE – 28/03/1986

Adres: Aydınevler Mahallesi, Malazgirt Sokak, D. Alibey Apartmanı, No:6, Daire:6
Maltepe/İSTANBUL

E-Posta: dmrts_huseyin@yahoo.com

Lisans: Balıkesir Üniversitesi Makina Mühendisliği

TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR/SUNUMLAR

▪ Demirtaş, H. E., Solum, C ve Ergun C.: Havacılık Sektöründe Kullanılan Kompozit Zırhların Sonlu Elemanlar Yöntemiyle İncelenmesi. *IV Ulusal Havacılık ve Uzay Kongresi*, Eylül 12-14, 2012 İstanbul, Turkey.