



**ALÜMİNA SERAMİK ÖN YÜZLÜ POLİETİLEN DESTEKLİ ZIRH
MALZEMESİNİN BALİSTİK DAVRANIŞININ DENEYSEL VE SAYISAL
ANALİZİ**

Mehmet Akif AKDOĞAN

**DOKTORA TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

OCAK 2018

Mehmet Akif AKDOĞAN tarafından hazırlanan “ALÜMİNA SERAMİK ÖN YÜZLÜ POLİETİLEN DESTEKLİ ZİRH MALZEMESİNİN BALİSTİK DAVRANIŞININ DENEYSEL VE SAYISAL ANALİZİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi Makina Mühendisliği Anabilim Dalında DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Osman Selim TÜRKBAŞ

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Başkan : Prof. Dr. Can ÇOĞUN

Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Çankaya Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Üye : Prof. Dr. Müfit GÜLGEÇ

Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Çankaya Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Üye : Doç. Dr. Yusuf USTA

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Üye : Yrd. Doç. Dr. Nihat GEMALMAYAN

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Tez Savunma Tarihi: 10/01/2018

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Doktora Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Prof. Dr. Sena YAŞYERLİ

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Mehmet Akif AKDOĞAN

10/01/2018

ALÜMİNA SERAMİK ÖN YÜZLÜ POLİETİLEN DESTEKLİ ZIRH MALZEMESİNİN BALİSTİK DAVRANIŞININ DENEYSEL VE SAYISAL ANALİZİ

(Doktora Tezi)

Mehmet Akif AKDOĞAN

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ocak 2018

ÖZET

Savunma teknolojileri, tarih boyunca ülkelerin siyasi ve ekonomik anlamda gücünü belirleyen önemli etkenlerden biri olmuştur. Bu teknolojilerin en önemlisi ise askeri ve sivil personeli korumak amacıyla kullanılan zırh sistemleridir. Uzun yıllar boyunca zırh malzemesi olarak metaller ve alaşımları kullanılmıştır. Ancak zamanla gelişen askeri hücum gücü ve mermi teknolojisi nedeniyle alışlagelmiş zırh yöntemleri etkinliğini kaybetmiştir. Bu nedenle hızla gelişen savunma uygulamalarına yönelik değişik mekanik özelliklere sahip yeni malzemeler geliştirme ihtiyacı doğmaktadır. Bu tez kapsamında, alümina (Al_2O_3) seramik önyüzlü ve ultra yüksek molekül ağırlıklı polietilen (UHMWPE) destek tabakalı kompozit bir zırh sisteminin 7,62 mm x51 mm (AP) zırh delici mermisine karşı balistik testleri yapılmış ve meydana gelen hasar yapıları incelenmiştir. Ayrıca deneyleri yapılan zırh sistemi ve merminin yüksek hızlı darbe sonucu oluşan davranışları Autodyn programı yardımıyla modellenmiş, analiz sonuçları gerçekleştirilen deneysel çalışmalarla karşılaştırılmış ve yorumlanmıştır. Tez kapsamında yapılan balistik testler Nurol Teknoloji A.Ş. laboratuvarları bünyesinde gerçekleştirilmiştir. Belirlenen zırh kombinasyonunun balistik testler sonucu koruma performansının yeteri kadar yüksek olduğuna ve saha kullanımı için uygun bir seçim olacağına kanaat getirilmiştir. Ayrıca analizlerde elde edilen sonuçlar deneysel sonuçlarla karşılaştırıldığında, oluşan kırılma konisi; hasar büyüklüğü ve yapısı; çatlak yayılımı; mermi hasarı; arka destek katmanındaki göçük miktarı gibi bir çok özellik bakımından birbirlerine mükemmele yakın şekilde uyum sağladığı görülmüştür. Bu tez kapsamında yer alan deneysel çalışmaların ve oluşturulan sayısal modelin de literatüre başka bir bakış açısı sağlaması, ileride yapılacak çalışmalara bir altyapı sağlaması beklenmektedir.

Bilim Kodu : 91414

Anahtar Kelimeler : Balistik sistemleri, seramik kompozit zırh, sayısal modelleme

Sayfa Adedi : 130

Danışman : Yrd. Doç. Dr. Osman Selim TÜRKBAS

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL ANALYSIS OF BALLISTIC BEHAVIOUR OF
ALUMINA CERAMIC FACED AND POLYETHYLENE REINFORCED ARMOUR
MATERIAL

(Ph. D. Thesis)

Mehmet Akif AKDOĞAN

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

January 2018

ABSTRACT

Throughout history, defense technologies have always been one of the factors defining the political and economic power of the states. The most important of these technologies has been the armour systems utilized for the defense of the military and civilian personel. For years on end, metals and their alloys have been used as armour material. However, due to the improving strength of military offence and bullet technology, the conventional armour methods have lost their effectiveness. Thus, the necessity to develop new equipment with different mechanical features for rapidly developing defense practices has arisen. Within the scope of the dissertation, the ballistic tests of a composite armour system with a support layer of ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE) and an alumina (Al_2O_3) ceramics face were conducted against the 7.62mm x51mm armour piercing (AP) bullet and the damage patterns were analyzed. Also, the behavior of the bullets in high speed impact and the armour system that was experimented were modeled with the help of Autodyn program. The results of the analysis were compared to the conducted experiments and commented upon. The ballistic tests within the extent of the dissertation were conducted within Nurol Technologies Inc. laboratories. It was decided by the ballistic test that the protective performance of the given armour combination is high enough and is a suitable choice for field application. Additionally, when the results from the analysis were compared to those of experiments, it was observed that they were almost perfectly compatible regarding many features such as occurring fracture cone; damage size and structure; crack expansion; bullet damage; size of the dent in the back support layer. The experimental works and the produced numerical modal within the scope of this dissertation are expected to provide the literature with a new perspective and the further studies with a foundation.

Science Code : 91414

Key Words : Ballistic systems, ceramic composite armour, numerical simulation

Page Number : 130

Supervisor : Assist. Prof. Dr. Osman Selim TÜRKBAŞ

TEŞEKKÜR

Doğrudan ve dolaylı olarak bir çok kişinin emeğinin geçtiği bu tez çalışmasında öncelikli olarak bu süreçte benimle tüm bilgi ve tecrübelerini paylaşan, tez çalışmasının her aşamasında bana destek olan saygıdeğer danışmanım Yrd. Doç. Dr. Osman Selim TÜRKBAS'a teşekkür ederim.

Yine bilgi ve tecrübelerini tez izleme süreci boyunca benimle paylaşarak, tezin yönlendirilmesinde ve sonuçlanmasında büyük emekleri olan hocalarım Sayın Prof. Dr. Müfit GÜLGEÇ, Sayın Prof. Dr. Can ÇOĞUN, Sayın Doç. Dr. Yusuf USTA ve Sayın Yrd. Doç. Dr. Nihat GEMALMAYAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Tezin deneysel çalışmalarının yapılması aşamasında desteklerinden dolayı Nurol Teknoloji Sanayi ve Madencilik A.Ş'ye, çalışanlarından Ar-Ge Müdürü Sayın Barış KÖKÜÖZ ve Üretim Mühendisi Sayın Mert KORKMAZ'a; teşekkürü borç bilirim.

Son olarak hayatım boyunca maddi manevi desteklerini esirgemeyen annem Müjgan AKDOĞAN, babam Güngör AKDOĞAN, ablalarım Zeynep SESKİR, Zehra AKDOĞAN, ve sevgili eşim Hande OVALI AKDOĞAN'a minnet ve şükranlarımı sunarım.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	x
RESİMLERİN LİSTESİ.....	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiii
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	7
2.1. Darbe Test Teknikleri.....	7
2.2. Balistik Test Standartları	13
2.3. Seramik Zırh Sistemleri ve Seramiklerin Darbe Davranışı.....	15
2.4. Zırh Bileşenleri ve Özellikleri	21
2.5. Sayısal Modelleme	24
2.5.1. Ansys Autodyn.....	26
2.5.2. Eksplisit ve implisit analiz yöntemleri	26
2.5.3. ANSYS Autodyn malzeme modelleri	28
2.6. Seramik Malzeme Modeli ve Davranışı	30
2.7. Sonlu Elemanlar ve Ağ Modeli.....	35
2.8. Zırh Sistemlerinin Sayısal Modellenmesi	46
3. MATERYAL VE YÖNTEM	51
3.1. Zırh Sisteminde Kullanılan Materyal	51

Sayfa

3.2. Test Yöntemi	55
3.3. Sayısal Modelleme	59
4. TEST VE ANALİZLERDE ELDE EDİLEN SONUÇLAR.....	69
4.1. Balistik Teslerde Elde Edilen Sonuçlar.....	69
4.2. Sayısal Modellemelerde Elde Edilen Sonuçlar	75
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	113
KAYNAKLAR	117
EKLER.....	123
EK-1. Alümina seramik Laboratuvar analizleri	124
EK-2. Alümina seramik sertifikası	125
EK-3. 7,62 mm x51 AP ve FMJ Mermi teknik resimleri	128
ÖZGEÇMİŞ	129

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 1.1. Gerinim hızlarına göre darbe test teknikleri	4
Çizelge 2.1. Avrupa Balistik Standartları (EN1063)	14
Çizelge 2.2. NIJ Standartları (0108.01)	14
Çizelge 2.3. NATO Standartları (STANAG 4569)	14
Çizelge 2.4. Zırh sistemlerinde kullanılan seramiklerin malzeme özellikleri	16
Çizelge 2.5. Zırh penetrasyonuna etki eden faktörler	19
Çizelge 2.6. Johnson ve Holmquist malzeme modeli (JH2) girdi değerleri	34
Çizelge 2.7. JH2 malzeme modeli ayarlanabilir sonuç değişkenleri	34
Çizelge 3.1. AL ₂ O ₃ -99.7 (Alumina malzeme modeli).....	63
Çizelge 3.2. STEEL 4340 (Çelik malzeme modeli)	63
Çizelge 3.3. EPOXY RES. (Epoksi reçine malzeme modeli).....	63
Çizelge 3.4. POLYETHYL. (Polietilen malzeme modeli)	64
Çizelge 4.1. Kontak tipleri ve özellikleri	76

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. Seramiklerde parçacık tutucu olmadan ve parçacık tutucu ile balistik çarpışma	2
Şekil 1.2. Çok katmanlı seramik kompozit zırh modeli.....	3
Şekil 2.1. Charpy ve Izod deney düzeneği ve numuneleri	8
Şekil 2.2. Serbest ağırlık düşürme test düzeneği	8
Şekil 2.3. Bertram Hopkinson'un deney düzeneği ve numuneleri	11
Şekil 2.4. Parçalı Hopkinson Basınç çubuğu deney düzeneği	12
Şekil 2.5. Balistik test düzeneği	13
Şekil 2.6. Balistik hasar türleri.....	17
Şekil 2.7. Seramik zırh sisteminde darbe sonucu oluşan hasar şekli	18
Şekil 2.8. Seramik kompozit zırh penetrasyon mekanizması	19
Şekil 2.9. JH2 malzeme modelinin tanımı	32
Şekil 2.10. Hasar ve kırılmanın fiziksel tanımı.....	33
Şekil 2.11. Yapısal 3B katı eleman şekilleri ve serbestlik dereceleri	35
Şekil 2.12. Dört nodlu tetrahedral eleman	35
Şekil 2.13. Sekiz düğüm noktalı hekzahedral eleman	42
Şekil 2.14. Sonlu elemanlar analizi sonuçlarının yakınsaması	44
Şekil 2.15. Hekzahedral ve tetrahedral elemanlar ile analiz sonuçları	45
Şekil 2.16. Merminin kinetik enersinin zamana göre değişimi	49
Şekil 3.1. Deneylerde kullanılan seramik kompozit zırh modeli	51
Şekil 3.2. Zırh delici (AP) ve bakır ceket kaplı kurşun (FMJ) mermi	53
Şekil 3.3. Deneylerde kullanılan balistik test düzeneği	58
Şekil 3.4. Mermi katı modeli	60
Şekil 3.5. 2,5 mm ve 0,5 mm boyutlu elemanlara bölünen seramik karolar	65

Şekil	Sayfa
Şekil 3.6. Eleman sayılarına göre $1,8 \times 10^{-2}$ ms'deki gerinim hızı grafiği	65
Şekil 3.7. Mesh sayılarına göre $1,8 \times 10^{-2}$ ms'deki gerinim grafiği	66
Şekil 3.8. Analizlerde kullanılan 2 milyon sonlu elemana ayrılmış zırh sistemi	67
Şekil 4.1. 0,12 ms'de (a) rough ve (b) bonded kontak tiplerine göre analiz sonuçları	77
Şekil 4.2. Hasar ve kırılmanın oluşumu	77
Şekil 4.3. Kırılma tipleri	78
Şekil 4.4. Kırılma mekaniği	79
Şekil 4.5. x-y düzleminde çarpışma noktasının kesitinde hasar oluşumu.....	81
Şekil 4.6. x-z düzleminde çarpışma noktasının kesitinde hasar oluşumu	84
Şekil 4.7. Kırılma konisi oluşumu	87
Şekil 4.8. y-z düzleminde seramik katman ön yüzeyinde hasar oluşumu	88
Şekil 4.9. y-z düzleminde seramik katman arka yüzeyinde hasar oluşumu.....	92
Şekil 4.10. Hasar ve gerinim analiz sonuçları	96
Şekil 4.11. x-y düzleminde çarpışma noktasının kesitinde gerinim oluşumu.....	97
Şekil 4.12. y-z düzleminde seramik katman ön yüzeyinde gerinim dağılımı	100
Şekil 4.13. y-z düzleminde seramik katman arka yüzeyinde gerinim dağılımı	104
Şekil 4.14. Deney numunesi ile analiz sonuçlarındaki hasar dağılımları	108
Şekil 4.15. Deney numunesi ile analiz sonuçlarındaki gerinim dağılımları	108
Şekil 4.16. Merminin x eksenindeki hızının zamana göre değişimi	109
Şekil 4.17. Sistemdeki tüm elemanların toplam enerji değişimi	110
Şekil 4.18. Çevre seramiklerin enerji değişimleri	111
Şekil 4.19. Sistemdeki tüm elemanların kinetik enerji değişimi.....	112

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 2.1. Jiusti ve diğerlerinin kullandığı dolgunsuz deney numuneleri	23
Resim 2.2. Jiusti ve diğerlerinin kullandığı jeopolimer dolgulu deney numuneleri	23
Resim 2.3. Jiusti ve diğerlerinin kullandığı epoksi dolgulu deney numuneleri.....	23
Resim 2.4. Ansys Workbench programını arayüzü	25
Resim 3.1. Deneylerde kullanılan alümina seramik karolar	52
Resim 3.2. 7,62mm x51 (AP) fişek ve kesiti	54
Resim 3.3. Ultra yüksek molekül ağırlıklı polietilen kompozit.....	54
Resim 3.4. Cam-fiber dokuma kumaş	55
Resim 3.5. Zırh sisteminde kullanılan Alumina seramiklerin dizilişi	56
Resim 3.6. Üzerinde cam-fiber kumaş bulunmayan deney numunesi	56
Resim 3.7. Üzerinde bir kat cam-fiber kumaş bulunan deney numunesi	57
Resim 3.8. Fırınlanmış ve kurumuş deney numuneleri.....	57
Resim 3.9. Test düzeneğine bağlanmış zırh numunesi	59
Resim 3.10. Deneysel çalışması yapılan zırh sisteminin katı modellemesi	62
Resim 4.1. Balistik testler sonucu deney numuneleri	69
Resim 4.2. 7.62mm x51 zırh delici mermi ve atış sonrası kırılan mermi çekirdeği.....	70
Resim 4.3. Ön yüzeyinde bir kat kumaş bulunan ve bulunmayan zırh sistemleri.....	71
Resim 4.4. Kumaştan temizlenen seramik zırh ön yüzeyi	72
Resim 4.5. Seramik katmanın arka yüzeyinde oluşan kırılma konisi	73
Resim 4.6. Seramik katmanın arka yüzeyinde oluşan çatlak dağılımı	73
Resim 4.7. Kompozit zırh sistemlerinin arka yüzeylerinde oluşan çöküntü miktarları....	74

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler

Açıklamalar

Al_2O_3	Alüminyum oksit (Alümina)
AlN	Alüminyum nitrat
B_4C	Bor karbür
β	Hacim artışı faktörü
δ	Yer değiştirme vektörü
Λ	Gerinim enerjisi
E	Elastisite modülü
Em	Kütle etkinlik değeri
ε_p	Eşdeğer plastik gerinim
$\dot{\varepsilon}_0$	Referans gerinim hızı
G	Kayma modülü
Kg	Kilogram
K	Bulk modülü
K_c	Kırılma tokluğu
K_i	Gerilme şiddet faktörü
m^2	Metrekare
μ	Sıkıştırma faktörü
μ_f	Sürtünme katsayısı
ν	Poission oranı
P	Basınç
P^*	Normalize edilmiş basınç
P_{HEL}	Hugoniot elastik limitteki basınç
ρ	Yoğunluk
SiC	Silisyum karbür
SiN	Silisyum nitrid
Γ	Gruneisen faktörü

Simgeler**Açıklamalar**

γ	Yüzey faktörü
t_m	Ergime sıcaklığı
t_0	Referans sıcaklık
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	Asal gerilmeler
σ	Gerçek eşdeğer gerilme
σ^*	Normalize edilmiş eşdeğer gerilme
σ_{HEL}	Hugoniot elastik limitteki eşdeğer gerilme
σ_i^*	Normalize edilmiş hasarsız eşdeğer gerilme,
σ_f	Kırılma gerilmesi
σ_f^*	Normalize edilmiş kırılma gerilmesi
σ_Y	Akma gerilmesi
TiB_2	Titanyum diborür
u	x eksenindeki yer değiştirme
v	y eksenindeki yer değiştirme
w	z eksenindeki yer değiştirme
ZrO_2	Zirkonyum dioksit

Kısaltmalar**Açıklamalar**

AP	Zırh delici (Armour Piercing)
CAD	Bilgisayar Destekli Tasarım
FEA	Sonlu Elemanlar Analizi
FMJ	Bakır gömlek kaplı (Full Metal Jacket)
HEL	Hugoniot Elastik Limit
NIJ	Ulusal Adalet Enstitüsü (National Institute of Justice)
NATO	Kuzey Atlantik Antlaşması Örgütü
PVC	Polivinil klorür (C_2H_3Cl) _n
SHPB	Parçalı Hopkinson Basınç Çubuğu
STANAG	Standardizasyon Protokolü (Standardization Agreement)
UHMWPE	Ultra yüksek molekül ağırlıklı polietilen

1. GİRİŞ

Savunma sanayii, tarih boyunca ülkelerin siyasi ve ekonomik anlamda gücünü belirleyen önemli etkenlerden biri olmuştur. Bu nedenle devletler, savunma sanayii üzerindeki teknolojik gelişmelere büyük önem vermektedir. Bu teknolojilerin en önemlisi ise askeri ve sivil personeli korumak amacıyla kullanılan zırh sistemleridir.

Uzun yıllar boyunca zırh malzemesi olarak metaller ve alaşımları kullanılmıştır. Ancak zamanla gelişen askeri hücum gücü ve mermi teknolojisi nedeniyle alışlagelmiş zırh yöntemleri etkinliğini kaybetmiştir. Hızla büyüyen sanayii ve bir çok yeni uygulama yönteminin geliştirilmesiyle birlikte yeni zırh sistemleri rahatlıkla tasarlanabilmekte ve uygulamaya geçirilebilmektedir.

Zırh sistemleri tasarlanırken, oluşacak tehditlere yönelik etkin bir koruma sağlayabilmesi için malzemenin mekanik özellikleri, hacim ve ağırlık gibi parametreleri büyük önem teşkil etmektedir. Bu nedenle hızla gelişen savunma uygulamalarına yönelik değişik mekanik özelliklere sahip yeni malzemeler geliştirme ihtiyacı doğmaktadır.

Zırh Sistemleri

Zırh sistemlerinde ağırlık en önemli parametrelerden biridir. Araçlar için hafif sayılabilecek zırh sistemleri personel için aşırı ağır olabilmektedir. Koruma performansından taviz vermeden daha hafif ve daha kullanışlı zırhların tasarımı ve üretimi ön planda tutulmaktadır. Bu yüzden de özgül ağırlıkları yüksek olan alışlagelmiş zırh çelikleri yerine kompozit malzemelere yönelim artmıştır.

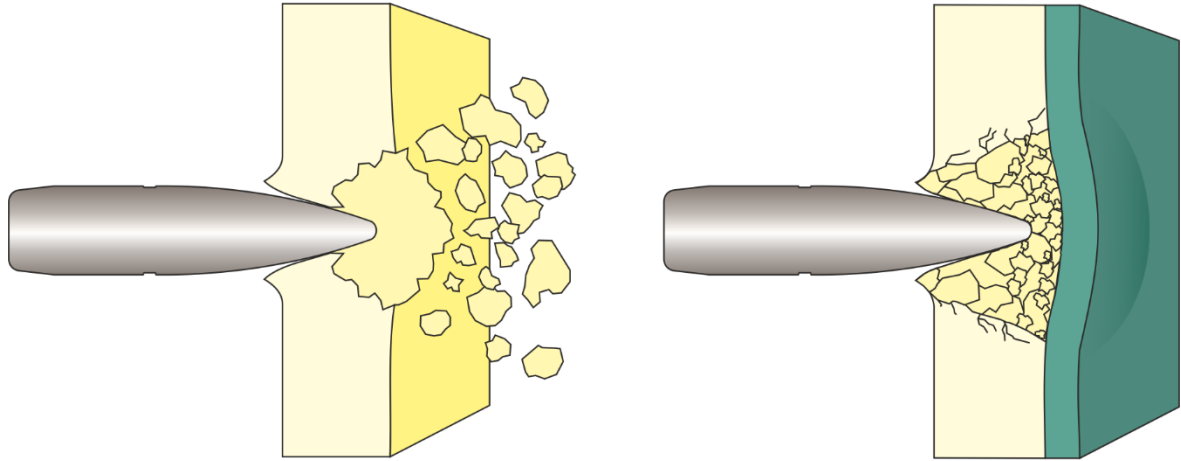
Zırh sisteminin ağırlığı değerlendirilirken, mutlak ağırlığından ziyade alan yoğunluğuna bakılmalıdır. Alan yoğunluğu, zırh sisteminin ağırlığının korunulan alana oranı şeklinde ifade edilir. Birimi kg/m^2 'dir. Alan yoğunluğu zırhın fiziksel özelliği olduğundan dolayı darbeye karşı etkili olup olmadığını göstermez. Bu yüzden, zırh sistemlerinin performansları dikkate alınırken aynı tehdite karşı verdikleri tepkiler göz önünde bulundurularak kıyaslamalar yapılmalıdır.

Bir zırhın kütle etkinlik değeri (E_m), genellikle tank zırhı için kullanılan MIL-A-12560 ve MIL-A-46100 standartlarında haddelenmiş zırh çeliklerinin oranıdır [1-5]:

$$E_m = \text{Haddelenmiş zırh çeliğinin alan yoğunluğu} / \text{zırh sisteminin alan yoğunluğu}$$

Bu birimsiz oran MIL-A-12560 ve MIL-A-46100 çelikleri için *bir* kabul edilmektedir. Aynı tehdite karşı aynı performansı gösteren sistemlerden E_m değeri büyük olan tercih edilebilir. Yüksek hızlı darbelerde de seramiklerin kütle etkinliklerinin zırh çeliklerinden daha fazla olduğu bilinmektedir [1-5].

Seramik kompozitler yüksek sertlikleri, yüksek basma dayanımları ve düşük özgül ağırlıkları nedeniyle zırh sistemlerinde tercih edilmektedir. Ancak seramikler tek başlarına zırh malzemesi olarak kullanılamamaktadır. Seramiklerin balistik amaçlı kullanımları esnasında merminin çarpma etkisi ile çok sayıda parçacıklara ayrılabilmekte ve bu parçacıklar korunması istenen yüzeyde hasar meydana getirebilmektedir. Bu nedenle seramiklerin arkasına parçacık tutucu ve destek tabakası olarak, metal ya da polimer bazlı kompozit malzemeler ilave edilmektedir (Şekil 1.1). Bu sayede zırh arkasında oluşabilecek etki azaltılarak; vücut zırhlarında personelde, zırhlı araçlarda da aracın ana gövdesinde oluşabilecek zarar en aza indirgenmektedir.



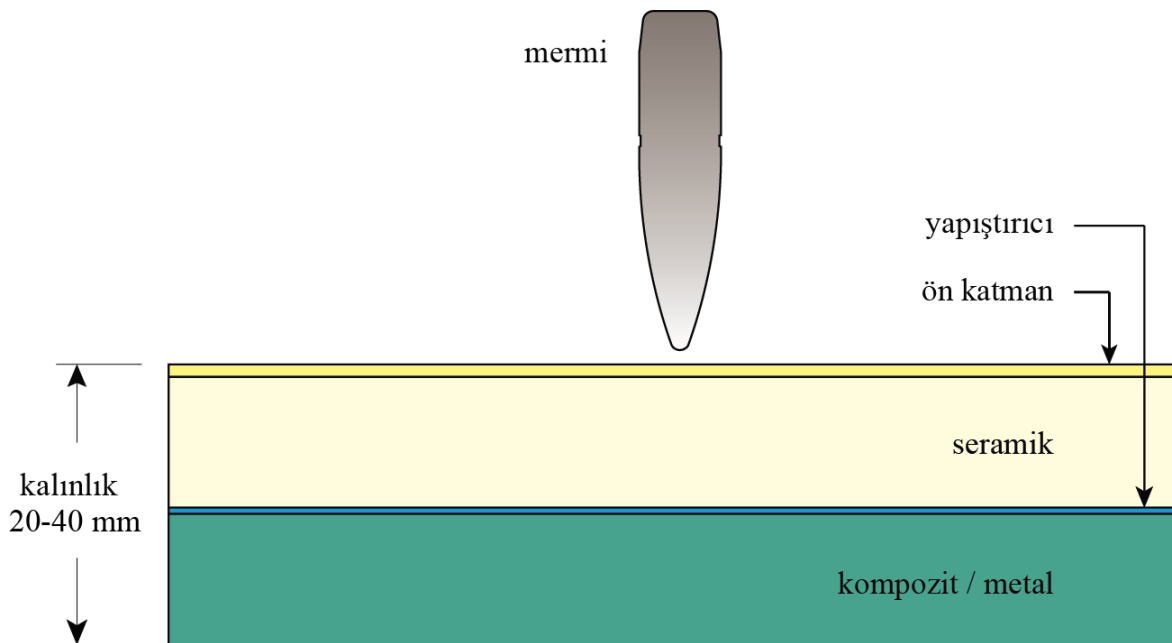
Şekil 1.1. Seramiklerde parçacık tutucu olmadan ve parçacık tutucu ile balistik çarpışma

Seramik önyüzlü zırh sistemlerinde en ön yüzeyde bulunan seramik katman; basma dayanımı, korozyon direnci ve sertliğinin yüksek olması nedeniyle üzerine isabet eden yüksek kinetik enerjiye sahip merminin ucunun deforme olmasına, hatta parçalanmasına

sebeptir. Arka yüzeyde bulunan polimer esaslı kompozit ya da sünek metal katman ise, belirli bir hıza kadar yavaşlayan ve körelen merminin artık kinetik enerjisinin sönmekte ve oluşan parçacıkların korunmak istenen yüzeye zarar vermesini engellemektedir [2].

Fiber takviyeli polimer matrisli kompozitler bir çok sektörde yaygın olarak kullanıldığı gibi, zırh sektöründe de kullanımı oldukça yaygındır. Seramiklerle birlikte oluşturduğu katmanlı zırh sistemleri hafif ve darbe dayanımı yüksek ürünler olarak tercih edilmektedir [2].

Genellikle seramikler ve polimer kompozitler birbirlerine, ince katmanlar halinde epoksi reçine yardımıyla ya da yine polimer bazlı yapıştırıcılar kullanılarak birleştirilmektedir. Bu katmanlara ek olarak en dış yüzeye koruyucu ve seramik yüzeyin dağılmasını engelleyici ince bir tabaka balistik kumaş ya da polimer kompozit yerleştirilebilmektedir. Ayrıca araçlarda kullanılırken istenildiği takdirde zırhın iç yüzeyine yangına karşı ya da elektromanyetik girişim bozucu katmanlar eklenebilmektedir [6]. Çok katmanlı zırh sistemlerindeki katmanların malzeme ve kombinasyonları değiştirilerek oluşabilecek tehditlere karşı en iyi koruma şekli sağlanmaktadır. Bu şekilde oluşturulmuş çok katmanlı zırh sistemine örnek Şekil 2.2’de şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 1.2. Çok katmanlı seramik kompozit zırh modeli

Test Teknikleri

Bir malzemenin uygulanan kuvvetlere karşı göstermiş olduğu tepki mekanik davranış olarak tanımlanmaktadır. Bu davranışları mekanik özellikler belirlemektedir. Malzemenin mekanik özellikleri çeşitli zorlanmalar altında oluşan gerilmeler ve şekil değiştirmeler ölçülerek saptanmaktadır ve mühendislik uygulamalarında kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri genellikle statik yükler altında gösterdikleri davranışlara göre belirlenmektedir. Ancak malzemeler dinamik yükler altında farklı mekanik özellikler sergilemektedir.

Geçmişten günümüze gelişen teknoloji ile birlikte malzeme bilimi de büyük bir gelişim süreci içerisinde. Havacılık, uzay ve askeri alanda kullanılmak üzere tasarlanmış yeni parçaların düşük ve yüksek hızlarda alacakları darbelere karşı göserecekleri davranışlar büyük önem teşkil etmektedir. Bu tür parçaların mekanik özelliklerinin tespit edilebilmesi tasarımcı açısından büyük kolaylık sağlamaktadır. Bu nedenle kullanım amaçlarına göre bu tarz parçalara düşük ya da yüksek hızda darbe testleri uygulanmalıdır.

Gerinim hızı, gerinimin zamana göre değişimidir ve birimi s^{-1} şeklindedir. Mekanik özelliklerin belirlenmesinde kullanılan birçok çekme, basma, kayma deneyleri yarı-statik olarak yapılmaktadır. Malzemelerin statik ve yarı-statik yükler altında göstermiş oldukları mekanik özellikler yüksek gerinim hızlarına maruz malzemeler için geçerli olmamaktadır. Yarı-statik deneylerdeki gerinim hızları genellikle $10^{-4} s^{-1}$ ile $10^{-1} s^{-1}$ arasında değişmektedir. Bir zırh sisteminin, işletme içerisinde bakım şartlarında ve muharebe ortamında maruz kalacağı çeşitli darbe türleri düşük ve yüksek hızlı darbe testleriyle ölçülebilmektedir. Değişik gerinim hızlarında yapılan darbe testleri için hangi hızda hangi yöntemin uygun olduğu Çizelge 1.1’de özetlenmiştir [7].

Çizelge 1.1. Gerinim hızlarına göre darbe test teknikleri [7]

Türü	Gerinim Hızı [s^{-1}]	Test Teknikleri
Bası	< 0,1	Geleneksel test cihazları
	0,1 - 100	Servo-hidrolik makineler
	0,1 - 500	Serbest ağırlık düşürme test düzeneği
	100 - 10^4	Split - Hopkinson deney düzeneği
	10^4 - 10^5	Balistik testler

Düşük hızda darbe testleri için Charpy ve izod gibi çentik deneyleri ile serbest düşürme test düzeneği ile yapılan deneyler tercih edilmektedir. Yüksek hızda yapılan darbe testleri için yaygın olarak kullanılan yöntemler Split Hopkinson basınç çubuğu, gaz tabancaları ve gerçek mermili balistik testlerdir. Balistik testler 10^4 ve üzeri gerinim hızına sahiptir.

Tez Kapsamı

Seramik kompozit zırh sistemlerinin darbe ve balistik özelliklerinin sayısal olarak modelleneceği bu tez kapsamında;

Alümina (Al_2O_3) seramik önyüzlü, ultra yüksek molekül ağırlıklı poli-etilen (UHMWPE) destek katmanlı bir kompozit zırh sisteminin yüksek hızda darbe davranışları deneysel olarak incelenmiş ve Ansys Autodyn programı kullanılarak sayısal modellemesi gerçekleştirilmiştir.

Deneylerde kullanılmak üzere Çin'den Xiamen Innovacera Advanced Materials Limited Şirketi'ne ait alümina (Al_2O_3) seramik karolar getirilmiş, poli-etilen destek tabakasıyla birlikte oluşturulan zırh sisteminin uluslararası standartlara göre balistik testleri yapılmış; sistemin darbe karakteristiği ve hasar şekilleri incelenmiştir.

Balistik testler Nurol Teknoloji Sanayi ve Madencilik A.Ş. Yenimahalle/Ankara balistik test laboratuvarında yapılmıştır. Seramik karolar, 3'er adet yan yana ve 3'er adet alt alta gelecek şekilde dizilmiş, epoksi reçine yardımıyla birbirleriyle ve arka destek katmanıyla birleştirilmiş ve ardından fırınlanmıştır. Testlerde Makine Kimya Endüstrisi yapımı çelik çekirdekli 7,62 mm x51 AP (zırh delici) mermi kullanılmıştır. Atış testlerinde mermi hızı düzeneğe ait sensörler yardımıyla ölçülmüş, uluslararası ilgili standartlar doğrultusunda testler gerçekleştirilmiştir.

Literatürde konu ile ilgili mevcut yayınlardan; seramikler ile ilgili yapılmış düşük ve yüksek hızda darbe çalışmaları, düşük hızda darbe testleri, split hopkinson basınç çubuğu testleri, balistik testler, zırh sistemleri ile ilgili çalışmalar, ilgili sayısal analiz ve modelleme çalışmalarına dair örnekler incelenmiş, deneylerde elde edilen sonuçlar ve oluşturulan modeller ile bağdaştırılmaya çalışılmıştır.

Modelleme yapılacak sonlu elemanlar programı olarak ANSYS Autodyn programı seçilmiş, program yardımıyla yapılan modellemeler deneylerde elde edilen ve literatürde yer alan sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

Ayrıca yine program yardımıyla çeşitli geometri ve yapıda oluşturulmuş modellemelerin analizleri yapılmıştır. Bulunan sonuçlar ise diğer analizler ve literatür ile mukayese edilerek yorum ve öneriler getirilmiştir.



2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

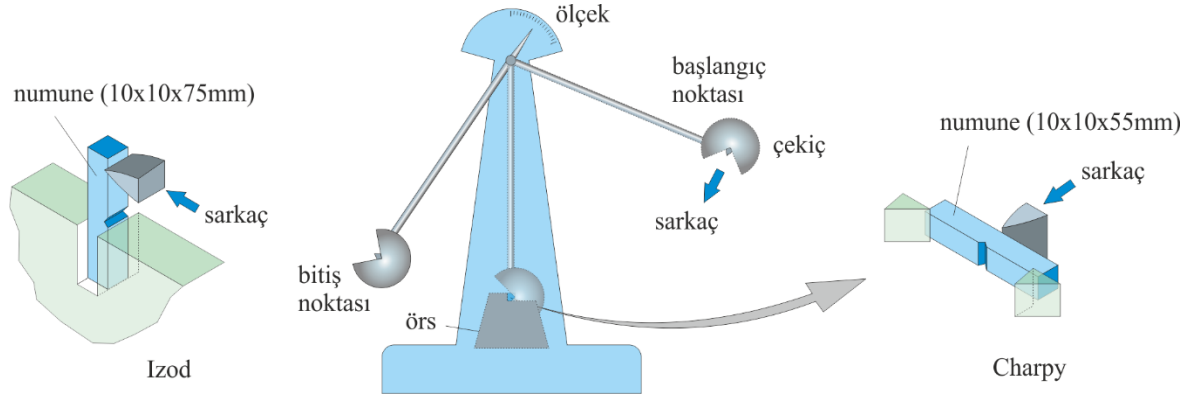
Havacılık, uzay, otomotiv ve askeri gibi birçok sektörde ele alınan mühendislik problemlerinde; bir yapı, sistem ya da bileşen üzerindeki darbe olasılığı, alışlagelmiş tasarım parametrelerinin yanında ayrı bir hipotez olarak düşünülmelidir. Bu hipotezlere, bir uzay aracına çarpan ufak bir göktaşı ya da uzay çözü; uçak motorunda fan kanatlarına çarpan bir parçacık ya da uçak havadayken çarpan bir kuş; otomobillerde kaza anında oluşan çarpışma etkileri gibi birçok örnek verilebilir. Askeri sanayide darbeye çok daha fazla örnek vermek mümkündür. Askeri araçlarda, uçaklarda, helikopterlerde ve personellerde; çarpışma, patlama, çatışma gibi etkiler esnasında oluşabilecek hasar ve zarar çok fazladır [8]. Kompozit malzemeler, bu gibi problemlerin çözümünde büyük fayda sağlamaktadır. Ancak bu amaçla üretilen parça ve malzemelerin kullanım amaçları doğrultusunda ne tür darbelere maruz kalabileceği iyice belirlenip, ona göre çeşitli hızlarda darbe deneylerine tabi tutulması gerekmektedir.

2.1. Darbe Test Teknikleri

Seramiklerin ve diğer kompozit malzemelerin darbeye karşı gösterdikleri davranışları incelemek amacıyla standartlaşmış bir test yöntemi bulunmamaktadır. Ancak bu malzemeler düşük enerjili ve yüksek enerjili olmak üzere bir çok test tekniğiyle incelenebilmektedir. Bu yöntemler arasında, düşük enerjili darbe testlerinde yaygın olarak kullanılan; izod ve charpy sarkaç testleri ile ağırlık düşürme test yöntemi, yüksek enerjili testlerde yaygın olarak kullanılan parçalı hopkinson basınç çubuğu ve gerçek mermi ile gerçekleştirilen balistik testler bulunmaktadır.

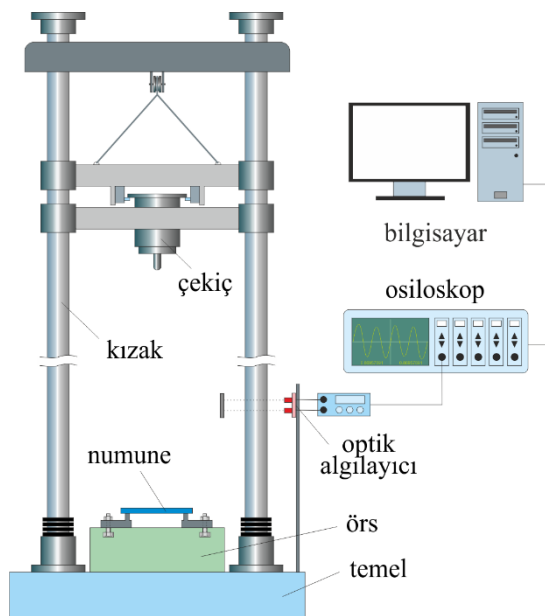
Düşük enerji seviyeli darbe testlerinden olan İzod ve charpy testlerinde, belirli bir yükseklikten bırakılan sarkaç, en alt noktada üzerinde çentik olan deney numunesine çarpıp kırdıktan sonra yoluna devam ederek ikinci bir yüksekliğe kadar çıkar. Bu başlangıç ve bitiş yükseklikleri arasındaki potansiyel enerji farkı, sönmelenen darbe enerjisi olarak hesaplanır [9]. Bu enerji farkı ne kadar yüksek ise, malzemenin tokluğu ve darbeye karşı direnci de o kadar yüksek olmaktadır. İzod ve Charpy yöntemlerinin arasındaki fark, numunelerin boyutları, çentiğin yeri ve numunenin düzeneğe yerleştirilme biçimidir. Şekil 2.1’de Izod ve

Charpy deney düzeneği ile bu iki yöntemde kullanılan numunelerinin yerleştiriliş biçimleri şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Charpy ve Izod deney düzeneği ve numuneleri

Yaygın olarak kullanılan bir diğer düşük enerjili darbe testi ise, serbest ağırlık düşürme test yöntemidir. Bu testler oldukça sade bir test düzeneği yardımıyla yapılmaktadır. Ayrıca test parametreleri ve numunenin fiziksel özellikleri istenildiği gibi değiştirilebilmektedir. Bu düzende belirli bir yükseklikten bırakılan düşme çekişi, çekicinin tam merkeze çarpmasını sağlamak amacıyla iki yana yerleştirilmiş kızakların yüzeyinde kayarak zemindeki tablaya bağlanan numunenin üzerine düşmektedir. Çekişin yüksekliği ayarlanarak potansiyel enerjisi değiştirilir ve bu potansiyel enerji, çarpışma noktasında kinetik enerjiye dönüşür.



Şekil 2.2. Serbest ağırlık düşürme test düzeneği

Düzenekler genellikle yer değiştirme, çekicinin ivmesi ve hızını ölçmektedir. Bu parametrelerin çarpışma anındaki değişimleri kaydedilir. Bu sayede darbe yükü-zaman, darbe enerjisi-zaman gibi grafikler elde edilebilir. Ayrıca absorbe edilen enerji darbe sonuçlarıyla ilişkilendirilir. Ağırlık düşürme test yöntemi, geniş test parametreleri nedeniyle, kompozit malzemelerin özellikleri belirlenirken sıkça başvurulmuş bir teknik haline gelmiştir. Literatürde bu yöntem kullanılarak yapılan bir çok yayın mevcuttur.

Schubel, Luo ve Daniel çalışmalarında, dokuma karbonfiber/epoxy yüzeye ve PVC köpük merkez malzemesine sahip sandviç panellerin düşük hızlardaki darbe davranışlarını incelemişlerdir. Testleri, serbest ağırlık düşürme test cihazı ile 1.6 - 5.0 m/s arası çarpışma hızlarında gerçekleştirmiş; çarpışma sırasında yük, gerinim ve sehim değerlerini kayıt altına almışlardır. Sandviç panelin üst ve alt yüzeylerin farklı noktalarına sekizer adet strain gauge yapıştırarak yüzeylerde oluşan gerinimleri belirlemişlerdir. Elde edilen tüm verileri yarı-statik yükleme verileri ile karşılaştırmış, malzemenin düşük hızlarda darbe karakteristiğini incelemişlerdir. Yaptıkları testler sonucunda elde ettikleri verilerin, çarpışma karakteristikleri nedeniyle oluşan sınırlı hasarın dışında yarı-statik testlerde elde edilen veriler ile çok yakın olduğunu belirtmişlerdir [10].

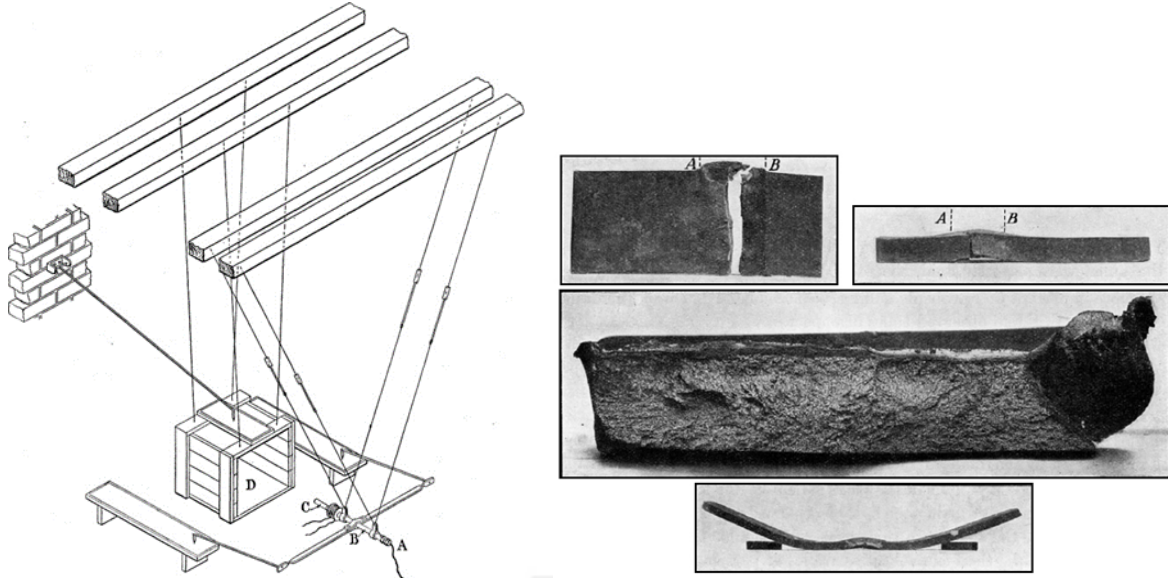
Bir diğer çalışmada ise Kalay, Ögel ve Yıldırım, 0,5 metre ile 4,5 metre arasında çalışma kapasitesine sahip ağırlık düşürme test düzeneği yardımıyla; tek ve çok katmanlı alaşım zırhlarının düşük hızlarda göstermiş oldukları balistik performanslara etkileyen parametreleri incelemişlerdir. Araştırmada, AA 2024 plakaların, statik yükler altındaki mekanik özellikleri ile ağırlık düşürme deneylerinden elde edilen değerler arasındaki ilişkiyi gözlemlemişlerdir. Ayrıca, bu plakalardan katmanlı yapılar oluşturarak düşük hızlarda darbe davranışlarını incelemişlerdir. Sonuç olarak, tek katman halindeki yapılarda kesme diski oluştuğunu, çok katmanlı olanlarda ise çukur meydana geldiğini; balistik hız ile log arasında doğrusal bir ilişki olduğunu; balistik limit hızın, sertlik, akma ve çekme dayanımları ile birlikte arttığını; tek katmanlı yapının kalınlığındaki artış ve çok katmanlı yapının katman sayılarındaki artış ile limit hızın artış gösterdiğini; ve aynı alan yoğunluğuna sahip tek katmanlı yapının, çok katmanlıya göre delinme direncinin daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir [11].

Evci ve Gülgeç ise, üç farklı kompozit üzerinde, çarpışma hasarının büyümesini, maksimum kuvvet sınırlarını ve Hertzien Failure hesaplanmasını incelemişlerdir. Deneylerde tek yönlü

E-Cam, dokuma E-Cam ve dokuma Aramid kompozitlerini kullanmışlardır. 100mm x 100mm ebatlarındaki numuneleri, serbest ağırlık düşürme test cihazı ile düşük hızlarda darbeye maruz bırakmışlardır. Geri sekme, delinme başlangıcı ve hasar limitleri çıkartmış, tek yönlü ve dokuma E-Cam kompozitlerin her ikisinin de enerji profil diyagramlarını elde etmişlerdir. Test sonuçlarına göre; dokuma kompozitin, tek yönlü kompozite göre düşük hızda çarpışmadan korunmasının daha üstün olduğunu görmüşlerdir. Dokuma kompozitlerde hasar yayılımının çok küçük bir alanla sınırlı kaldığı da vurgulamışlardır. Statik eğilme yüklemesinde tek yönlü E-Cam kompozitin dayanımı daha fazla iken dinamik yüklemde dokuma E-Cam kumaşın daha mukavemetli olduğunu görmüşlerdir. Ayrıca, Düşük enerjili çarpışmalarda dokuma kumaştaki delinme enerjisi limitlerinin, tek yönlü kumaşa göre daha fazla olduğunu saptamışlardır. Yine eşit enerji seviyelerindeki çarpışma testlerinde, dokuma E-Cam kompozitteki hasar alanının, tek yönlü E-Cam kompozitteki hasar alanına göre daha küçük olduğunu görmüşlerdir. Aynı enerji seviyelerinde Aramid kompozitin balistik koruma etkinliğinin, E-Cam kompozite göre en az iki kat daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir [12].

Balistik darbe üzerine yapılmış literatür çalışmalarına bakıldığında, 19. yüzyılın son çeyreğinden önce, yeterli imkanların olmaması ve deney düzeneklerinin kurulamaması nedeniyle darbe etkisi üzerine yapılan deneysel çalışmalar sınırlı kaldığı görülmektedir. Kayda geçen çalışmaların en önemlileri 1872 yılında John Hopkinson'un yaptığı çalışmalardır. John Hopkinson, çalışmalarında çelik bir tel üzerinde ağırlık düşürme testi uygulayarak oluşan gelilme dalgalarının kopmaya neden olduğunu gözlemlemiştir. Ayrıca kopmanın, hıza bağlı olarak telin sabit ya da darbenin olduğu tarafında gerçekleştiğinden bahsetmiş ve gerilme dalgalarının ilerleyişi üzerine teoriler geliştirmiştir [13-14].

John Hopkinson'un ölümünden sonra oğlu Bertram Hopkinson teorik çalışmaları sürdürmüştür. Şekil 2.3'de gösterilen ilk deneysel çalışmasını 1913 yılında oluşturduğu düzenek yardımıyla yapmıştır. Çelikten yaptığı bir çubuğun bir ucunda patlayıcılar ve mermiler yardımıyla basınç meydana getirmiştir. Çubuğun diğer ucuna ise aynı malzemeden yapılmış ve aynı çapta olan daha kısa bir çubuk yerleştirmiştir. İlk çubukta patlama sonucu meydana gelen gerilme dalgalarının kısa çubuğu fırlamasına neden olduğunu gözlemlemiştir. Kısa çubuğun olduğu tarafa yerleştirdiği bir balistik sarkaç yardımıyla da çubuğun momentumunu ölçmüştür [15-16]. Bu çalışmalar günümüzde kullanılan "*Parçalı Hopkinson Basınç Çubuğu (SHPB)*" test yönteminin temellerini oluşturmaktadır.

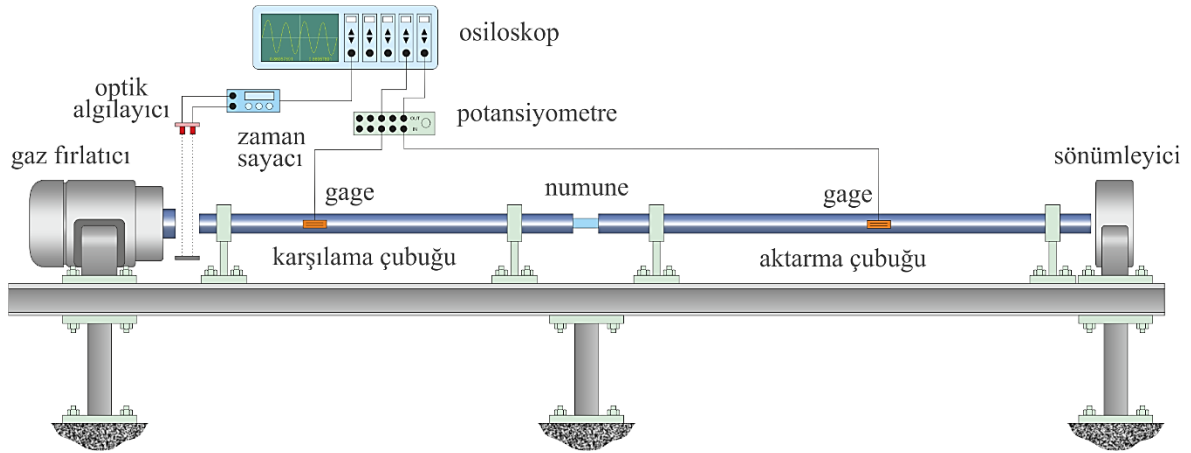


Şekil 2.3. Bertram Hopkinson'un deney düzeneği ve numuneleri [15]

1947 yılında Davies, “Hopkinson basınç çubuğundaki kritik çalışma” isimli çalışmasında Hopkinson basınç çubuğu üzerindeki dinamik yüklemeler sonucu oluşan şekil değişimlerini osiloskop yardımıyla ölçmüş, deneysel ve matematiksel olarak detaylı bir incelemede bulunmuştur. Ancak elde ettiği sonuçların kesin bir doğruluk taşımadığını belirtmiştir [17].

Davies'in çalışmasından bir yıl sonra ise günümüzde de kullanılan parçalı Hopkinson basınç çubuğu test tekniğini ve deney düzeneğini ilk geliştiren Kolsky olmuştur. Kolsky deney düzeneğinde güncellemelere giderek basınç çubuğu sayısını ikiye çıkartmış, numuneyi bu çubuklar arasına yerleştirmiş ve osiloskop yardımıyla ölçümlerini yapmıştır. Çalışmasında şekil değiştirme, gerinim hızı ve gerilmeleri ölçen Kolsky bazı malzemeler için dinamik yükler altında gerilme-gerinim grafiğini çıkarmıştır [18]. Hopkinson basınç çubuğunu geliştirerek ortaya çıkardığı bu deney düzeneği “Kolsky Bar” ya da “Parçalı Hopkinson Basınç Çubuğu” olarak adlandırılmaktadır. Bu düzenek sayesinde yüksek gerinim hızlarında ($10^2 - 10^4 \text{ s}^{-1}$) malzemelerin dinamik tepkileri ölçebilmektedir.

Krafft, Sullivan ve Tripper, 1954 yılında yaptıkları çalışmada basınç çubukları üzerine gerinim ölçerler yerleştirerek daha sağlıklı veri almayı başarmış, patlamaların yarattığı tehlikelerin önlenmesi amacıyla düzenekte bir gaz silahı kullanmışlardır [19]. Bu şekliyle düzenek günümüzde yaygın olarak kullanılmaktadır. Şekil 2.4’de şematik olarak Parçalı Hopkinson Basınç Çubuğu deney düzeneği gösterilmektedir.



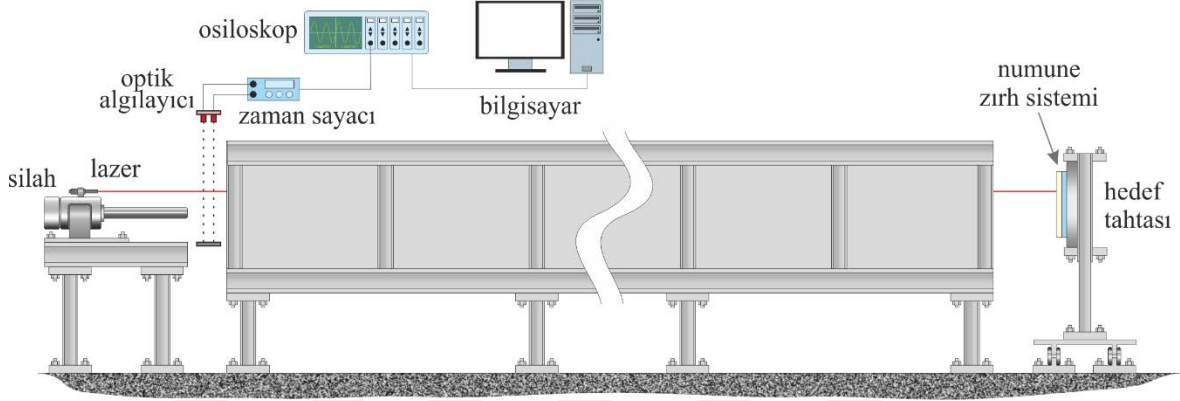
Şekil 2.4. Parçalı Hopkinson Basınç çubuğu deney düzeneği

Goyal ve Venkataraman çalışmalarında, oksijensiz, yüksek iletkenlik özelliğine sahip Bakırın yüksek gerinim hızı davranışını, parçalı Hopkinson basınç çubuğu tekniği ve dinamik girinti tekniği kullanarak değerlendirmişlerdir. Bu teknikler kullanılarak elde edilen verilerin karşılaştırılması sonucu iyi bir eşleşme gösterdikleri sonucuna varmışlardır. Ayrıca, gerinim oranının ve mikroyapısının, malzemenin davranışı ve gerinim hızı duyarlılığına etkisini tartışmışlardır. Dinamik girinti testleri için değerlendirilen strain hızı duyarlılık faktörünün, parçalı Hopkinson basınç çubuğu testleri için daha yakın olduğu ve tavllanmış oksijensiz, yüksek iletkenlik özelliğine sahip bakırın, literatür verileri ile uyumlu olan 10^3 s^{-1} 'lik gerinim hızının ötesinde, davranışlarının değiştiğini görmüşlerdir [20].

Parçalı Hopkinson basınç çubuğu dışında günümüzde en çok kullanılan yüksek gerinim hızında test türü gerçek mermi ile yapılan balistik testlerdir. Bu testler uluslararası standartlarda yer alan sınırlar doğrultusunda gerçekleştirilmekte ve test düzenekleri bu standartlara göre ayarlanmaktadır.

Düzenekte ana hatlarıyla ateşlemenin gerçekleştiği bir silah, hedef tahtası, güvenlik ekipmanları ve ölçüm sistemi bulunmaktadır. Ateşleyici olarak, mermi türüne göre gerçek tabancalar veya tüfekler kullanılmakta ya da mermi çekirdeğini direk fırlatan gaz silahları kullanılabilir. Namludan çıkan mermilerin hızları sensörler yardımıyla kayıt altına alınmaktadır. Hazırlanan numuneler, standartlarda yer alan uzaklıklara göre ayarlanabilen hedef tahtası üzerine yerleştirilmektedir. Merminin hedef üzerinde istenilen yere çarpmasını sağlamak amacıyla namlu üzerine bir lazer işaretçi yerleştirilebilir. Bu

ana yapıya ek olarak, hedefin delinmesi ihtimaline karşı hedef arkasına ve etrafa fırlayabilecek parçalara karşı hedefin çevresine koruyucu konstrüksiyonlar yerleştirilmektedir. Genel hatlarıyla bu şekilde oluşturulan bir balistik test düzeneğinin şematik gösterimi Şekil 2.5'te verilmiştir.



Şekil 2.5. Balistik test düzeneği

Sharma, Chandel, Bhardwaj, Singh ve Mahajan benzer bir düzenele küresel mermi kullanarak yaptıkları çalışmada, 15 mm kalınlığında AA2014-T652 dövme plakalarının, 800 m/s ile 1300 m/s arasındaki hız bölgesinde darbe tepkilerini incelemişlerdir [21]. Bandaru, Ahmad, ve Bhatnagar yine benzer bir düzenek yardımıyla, kevlar ve bazalt kumaşlarla güçlendirilmiş hibrid termoplastik kompozit zırhların balistik performansını incelemişlerdir [22].

2.2. Balistik Test Standartları

Hafif silahlara karşı kullanılan zırh sistemlerinde balistik performanslar ölçülürken genellikle Amerikan NIJ ve NATO STANAG 4569 standartları kullanılmaktadır. Ayrıca Avrupa birliğine ait Avrupa balistik standartları da (EN1063) mevcuttur.

Personelde kullanılan hafif silahlara karşı seramik zırh sistemleri için NIJ ve STANAG standartlarından seviye 3 yeterli olmaktadır. Avrupa balistik standartlarında ise BR6 ve BR7 kullanılabilmektedir. Balistik testlerde kullanılan standartlar Çizelge 2.1, 2.2 ve 2.3'te verilmiştir. Tez kapsamında yapılan deneylerde, mermi çeşidi, mermi özellikleri, atış mesafesi, mermi hızı gibi özellikler NIJ ve STANAG standartları doğrultusunda uygulanmıştır.

Çizelge 2.1. Avrupa Balistik Standartları (EN1063)

Seviye	Mermi Kalibresi	Mermi Ağırlığı	Mermi Hızı
BR 4	9 mm Luger	8,0 g	400 ± 10 m/s
	.357 Magnum	10,2 g	430 ± 10 m/s
	.44 Magnum	15,6 g	440 ± 10 m/s
BR 5	5.56 x 45	4,0 g	950 ± 10 m/s
	7.62 x 39	8,0 g	710 ± 10 m/s
BR 6	7.62 x 51	9,5 g	830 ± 10 m/s
BR 7	7.62 x 51	9,8 g	820 ± 10 m/s

Çizelge 2.2. NIJ Standartları (0108.01)

Zırh Tipi	Mermi Kalibresi	Mermi Ağırlığı	Mermi Hızı
I	.22 LRHV Lead	2,6 g (40 gr)	329 ± 15 m/s (1080 ± 50 ft/s)
	.380 ACP FMJ RN	6,2 g (95 gr)	322 ± 15 m/s (1050 ± 50 ft/s)
II-A	.40 S&W FMJ	11,6 g (180 gr)	322 ± 15 m/s (1050 ± 50 ft/s)
	9 mm FMJ	8,0 g (124 gr)	340 ± 15 m/s (1100 ± 50 ft/s)
II	.357 Magnum JSP	10,2 g (158 gr)	436 ± 15 m/s (1430 ± 50 ft/s)
	9 mm FMJ RN	8,0 g (124 gr)	367 ± 15 m/s (1205 ± 50 ft/s)
III-A	.44 Magnum SJHP	15,6 g (240 gr)	436 ± 15 m/s (1430 ± 50 ft/s)
	9 mm FMJ RN	8,0 g (124 gr)	436 ± 15 m/s (1430 ± 50 ft/s)
III	7.62mm FMJ (M80 Ball)	9,6 g (148 gr)	847 ± 15 m/s (2780 ± 50 ft/s)
IV	.30 Kalibre AP (M2)	10,8 g (166 gr)	878 ± 15 m/s (2880 ± 50 ft/s)

Çizelge 2.3. NATO Standartları (STANAG 4569)

Seviye	KE Tehdit	Mermi	Mesafe	Hız
1	Tüfek	7.62 x 51 NATO Ball M80	30 m	833 ± 20 m/s
		5.56 x 45 NATO SS 109		900 ± 20 m/s
		5.56 x 45 M193		937 ± 20 m/s
2	Piyade Tüfeği	7.62 x 39 API BZ	30 m	695 ± 20 m/s
3	Keskin Nişancı Tüfeği	7.62 x 51 AP (WC Core)	30 m	930 ± 20 m/s
		7.62 x 54R B32 API		854 ± 20 m/s
4	Ağır Makinalı Silah	14.5x114 API / B32	200 m	911 ± 20 m/s
5	Otomatik Top	25 mm APDS-TM-791	500 m	1258 ± 20 m/s

NIJ standartlarına göre yapılan balistik testlerde, zırh sisteminin arkasına insan vücudunu temsil eden bir macun yerleştirilmektedir. Bu yöntemle gerçekleştirilen testler sonucunda, zırh sisteminin arkasında meydana gelen çıkıntı, yani macunda oluşan çöküntü miktarının 44 milimetrenin altında olması istenmektedir. Bu değer, hayati organları koruma amaçlı belirlenmiş bir ölçüttür.

2.3. Seramik Zırh Sistemleri ve Seramiklerin Darbe Davranışı

Seramik kompozitler, birçok modern koruma sisteminin, araç ve personel zırhı olmak üzere en önemli parçalarını oluşturmaktadır. Walley'in araştırmalarına göre, birinci dünya savaşı sırasında metalleri emaye kaplamanın mermi dayanımına olumlu yönde etki ettiği görülmüştür. İkinci dünya savaşında ise fiberglas zırhların önyüzü olarak cam kullanmanın etkili bir yöntem olduğu anlaşılmıştır. Ancak, seramik kompozitlerin ilk olarak Vietnam savaşında geliştirilerek hizmete girdiği görülmüştür [23].

Seramikler, oldukça sert, basma ve eğilme mukavemet değerleri yüksek malzemelerdir. Eğilme mukavemeti, seramiklerin dayanımlarının belirlenmesinde sıklıkla kullanılır. En dayanıklı seramiklerden biri olan zirkonyum dioksit (ZrO_2), çeliğe yakın bir eğilme mukavemeti değerine sahiptir. Zirkonyalar, bu mukavemet değerlerini $900^{\circ}C$ 'nin üzerinde bile korurlar. Silisyum karbür (SiC) ve silisyum nitrür (SiN) ise eğilme mukavemet değerlerini $1400^{\circ}C$ 'nin üzerinde muhafaza edebilirler. Her ne kadar, seramikler sert, sıcaklığa dayanıklı olsalar da, bu malzemeler oldukça kırılgandırlar. Hızlı ısı değişimlerinde veya darbe aldıklarında kırılabilirler.

Seramikler; sahip oldukları dayanım, uzun ömür ve sertlik gibi mekanik özellikler sayesinde malzeme bilimi içerisinde oldukça önem arz ederler. Elektriksel ve manyetik özellikleri, seramikleri yalıtkan, yarı-iletken, iletken ve manyetikler olarak kullanıldıkları elektronik uygulamalarında değerli kılmaktadır. Aynı zamanda seramikler, yapılarda, uzay sanayisinde, biyomedikal ve nükleer endüstride önemli bir kullanıma sahiptirler.

Literatürde yer alan çalışmalar, seramiklerin yüksek sertlikleri sayesinde üzerilerine gelen merminin ucunu aşındırarak kütleştirdiğini, böylece merminin etkinliğini azalttığını göstermektedir. Zırh sistemlerinde genellikle düşük fiyatları nedeniyle Al_2O_3 (alümina) seramikler kullanılmaktadır. Geçmişten günümüze yapılan araştırmalara bakıldığında, zırh

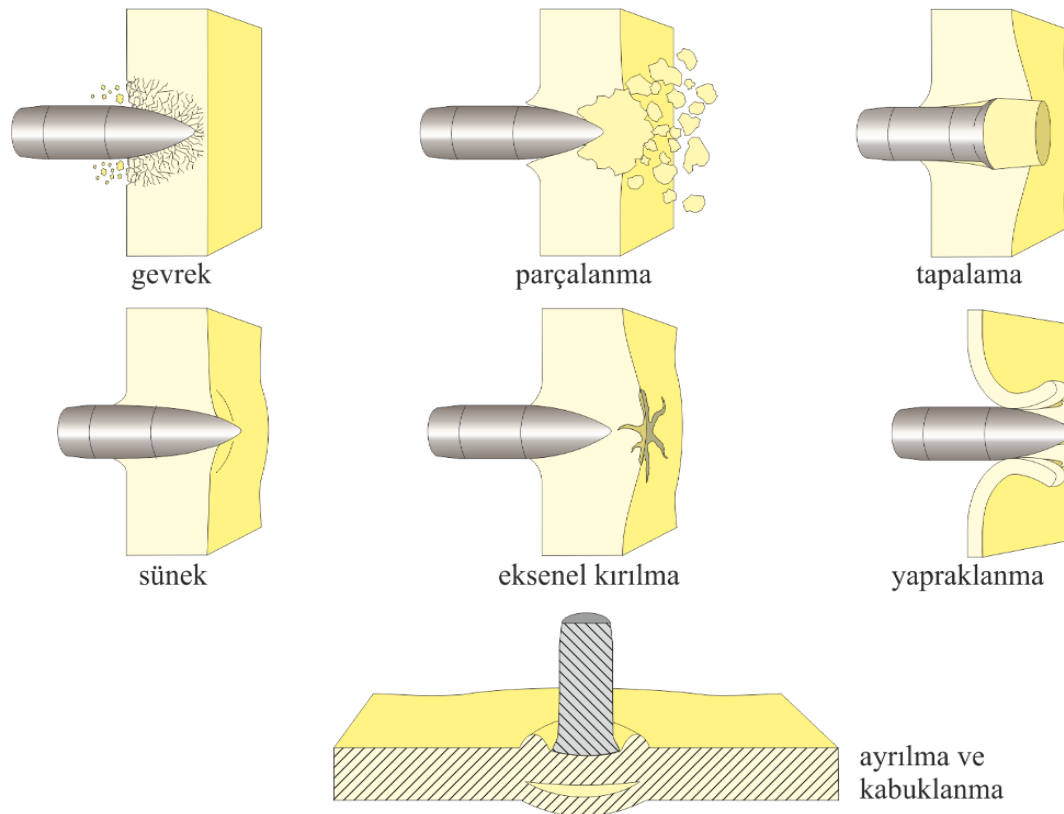
sistemlerinin yapımında, düşük ve yüksek saflıkta alümina (Al_2O_3), alüminyum nitrit (AlN), bor karbür (B_4C), silisyum karbür (SiC) ve titanyum diborür (TiB_2) gibi seramiklerin araştırma konusu olduğu görülmektedir. Alümina dışındaki seramikler, zırh sistemlerinde kullanılmakla birlikte, daha üstün mekanik özellikleri ve hafifliklerine rağmen yüksek fiyatları nedeniyle kullanım alanları daha sınırlı kalmaktadır. Zırh sistemlerinde kullanılan bazı seramiklerin malzeme özellikleri Çizelge 2.4’te verilmiştir [2, 23, 24].

Çizelge 2.4. Zırh sistemlerinde kullanılan seramiklerin malzeme özellikleri [24]

Malzeme	Erime Noktası [°C]	Yoğunluk [g/cm ³]	Sertlik HV [kg/mm ²]	Elastisite Modülü [Gpa]	Kırılma Tokluğu [Mpa/m ²]
Alümina (Al_2O_3)	2050	3,98	1600	395	3,80
Silisyum Karbür (SiC)	2300	3,15	2300	380	3,00
Silisyum Nitrat (Si_3N_4)	1900	3,20	1800	310	6,00
Bor Kabür (B_4C)	2450	2,52	3200	460	2,50
Titanyum Diborür (TiB_2)	2980	4,50	2100	540	5,47
Alüminyum Nitrat (AlN)	2200	3,26	1300	320	2,50

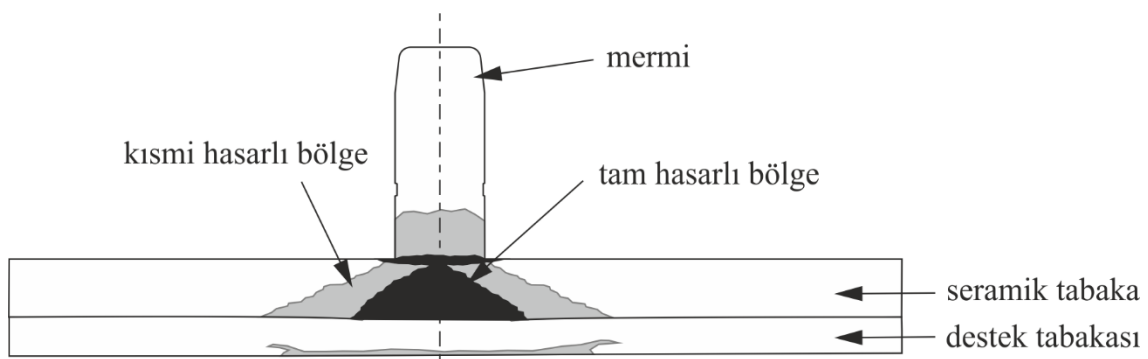
Literatürdeki çalışmalara göre penetrasyon sırasındaki hasar tipleri birkaç tipik türde tanımlanmaktadır. Bu hasar tipleri, hedefin malzeme direnci, plastik akışı ve kırılma davranışının, kinetik enerjinin emilimi için önemli parametreler olduğu hızlarda etkili olmaktadır ve zırh delici mermiler için geçerlidir. Penetrasyon sırasında sünek malzemelerde oluşan delik merminin çapına oldukça yakın genişlikte olmaktadır. Ancak enine kesit alındığında plastik deformasyonun, mermi çapının üç katına kadar çıktığı görülmektedir. Kırılgan malzemelerde ise penetrasyon deliğinin, mermi çapına göre birkaç kat arttığı görülebilmektedir. Hedefler, neredeyse tüm penetrasyon olaylarında gerilme dalgası yansımalarından etkilenmektedirler. Hem sünek hem de kırılgan malzemelerde, penetrasyon dirençlerine göre, mermi etkisi altında gerilmeler oluşur. Bu gerilmelerin malzemenin dayanımından yüksek olduğu yerler, hasar bölgesi olarak tanımlanmaktadır. Hasar bölgesi dışındaki deformasyonlar ise elastik olmaktadır [25-30]. Şekil 2.6’da gösterilen penetrasyon sırasındaki hasar tiplerinden olan gevrek kırılmada, ufak kırıklar ve çatlaklar halinde çarpışma yüzeyinden arka yüzeye doğru hasar oluşmaktadır. Sünek delinme, sünek malzemelerin karakteristik özelliklerini taşımaktadır. Gerilme, merminin ucunda yoğunlaşır ve krater eksen boyunca deformasyona neden olmaktadır. Mermi eksen boyunca

malzemede delik açmakta ve ilerlerken bu delik büyümektedir. Radyal kırıklar, çeşitli şekillerdeki mermilerin sünek malzemenin arka yüzeyinde meydana gelen ve çarpma ekseninden yıldız şeklinde dışarıya doğru yayılan deformasyon şeklinde açıklanmaktadır. İnce malzemelerde bu yıldız şeklinde kırılmalar kalınlık boyunca oluşmakta ve çatlaklar arasında kalan açılmal parçalar arka yüzeye doğru kıvrılmaktadır. Bu hasar türü de yapraklanma olarak isimlendirilmiştir. Silindirik ya da ucu kütleşen mermiler, malzemede oluşan yüksek kesme gerilmeleri nedeniyle zımba etkisi göstermektedir. Bu şekilde mermi kesiti şeklinde kopan parçalar, merminin önünde sıkışarak hareket etmektedir. Bu tür deformasyon türüne tapalama denmektedir. Sünek delinme, radyal kırıklar ve tapalama genellikle daha düşük hızlarda oluşmaktadır. Çok yüksek hızlarda ise ayrılma ve kabuklanma ya da parçalanma oluşmaktadır. Ayrılma, patlama ve yoğun darbe yükleri altında oluşan bası gerinim dalgasının arka yüzeyden yansması sonucu oluşmaktadır. Bası gerilmesine, çeki gerilmesine göre daha dayanıklı olan malzemelerde görülmektedir ve kırılma yüzeyinin davranışı, darbe konfigürasyonu, gerilmedalgası iletimi ve yansıma ile belirlenmektedir. Kabuklanma ise ayrılma ile aynı nedenlere sahip olmasına rağmen hasar, büyük deformasyonlar tarafından üretilir ve kırılma yüzeyi davranışı malzemedeki homojen olmayan ve anizotropi modelleri ile belirlenmektedir [25-30].



Şekil 2.6. Balistik hasar türleri

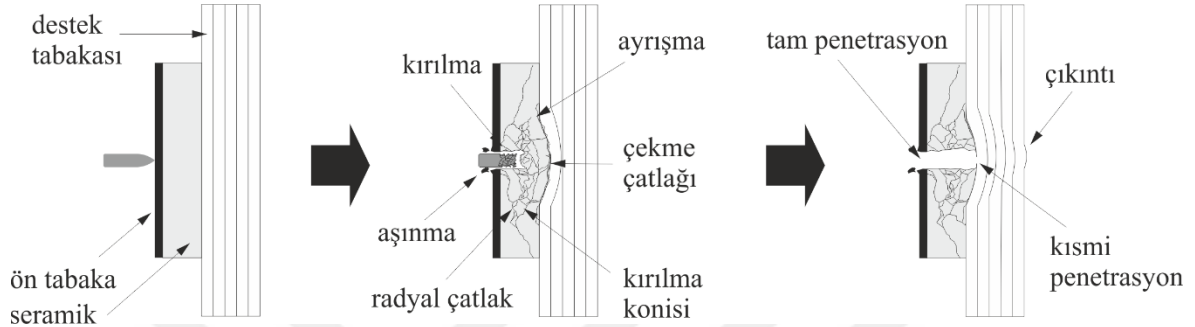
Balistik darbe esnasında oluşan bası dalgaları hem mermi hem de seramik üzerinde oluşmaktadır. Bu bası dalgaları seramik boyunca ilerlemekte, seramik arka yüzeyine ulaştığında bir kısmı arka destek katmanına iletilmektedir. Destek katmanının mekanik empedansı seramikten daha azdır. Daha düşük dalga hızları ve düşük yoğunluk nedeniyle bası dalgalarının arka destek katmanına iletilemeyen kısmı, seramik arka yüzeyinde çeki dalgalarına dönüşerek tekrar üst yüzeye doğru yansımaktadır. Seramik malzemelerinin çeki gerilmelerine dayanımları çok daha düşük olduğundan dolayı, oluşan gerilmeler kritik noktayı aştığı anda seramik malzeme deforme olmaktadır. Hasar görmüş veya çatlamış malzeme, üzerindeki darbe yükünü destek plakasının yüzeyinde daha geniş bir alana dağıtmaya yardımcı olan konik bir şekilde yığılır. Ve bu şekilde kırılma konisi meydana gelmektedir [31-33]. Bir merminin seramik zırh sistemine çarpması sırasında oluşan hasar Şekil 2.7’de gösterilmiştir. Seramikte oluşan hasar sonucu, mermi önünde meydana gelen kırılma konisi içerisinde çok sayıda irili ufaklı seramik parçacıkları bulunmaktadır. Bu parçacıkların merminin zırha nüfuz etmesini engellemede büyük rol oynadığı bilinmektedir. Ayrıca ufalanan seramik parçacıkların etrafa dağılmaması için seramiğin açık yüzeylerinden desteklenmesinin, zırhın etkisini arttırdığı görülmektedir. Balistik uygulamalarda seramikler kadar bir arada bulunan seramik tozlarının da etkili olduğu bilinmektedir [31]. Örneğin askeri koruma amaçlı kullanılan 500 mm’lik bir kum torbasının zırh delici mermileri ve bomba parçalarını, 150 mm’den az kalınlıktaki bir kum torbasının ise tabanca mermilerini durdurabilme yetisine sahip oldukları literatürdeki çalışmalarda görülmektedir [34].



Şekil 2.7. Seramik zırh sisteminde darbe sonucu oluşan hasar şekli [31]

W.K. Jung, H.S. Lee, S.H. Ahn, W. Lee, H.J. Kim ve J.W. Kwon yaptıkları çalışmada seramik kompozit zırh sisteminin penetrasyon mekanizmasını Şekil 2.8’deki gibi göstermişlerdir. Koruyucu ön tabaka merminin çarpma enerjisini düşürmekte, parçalanmış seramik parçalarını birarada tutmakta ve çatlak yayılımını azaltmaktadır. Mermi destek

tabakasına doğru ilerlerken aşınmaya uğramaktadır. Mermi seramik tabaka boyunca ilerlerken Hertz konik çatlağı (kırılma konisi) ve radyal çatlaklar meydana gelmektedir. Çarpışma sonucu seramik plakada tam penetrasyon, destek plakasında ise kısmi penetrasyon oluşumu gözlemlenmektedir. Ayrıca Jung ve diğerleri, zırh penetrasyonuna etki eden faktörleri Çizelge 2.5'teki gibi özetlemişlerdir [6].



Şekil 2.8. Seramik kompozit zırh penetrasyon mekanizması [6]

Çizelge 2.5. Zırh penetrasyonuna etki eden faktörler [6]

Mermi		Zırh	
Özellikler	Terminal Balistik	Özellikler	Zırh Plakası
Ağırlık	Hız	Yoğunluk	Boyut
Calibre	Çarpma Açısı	Young Modülü	Kalınlık
Uzunluk	Çarpışma Alanı	Kayma Modülü	Tabakalaşma
Şekil		Poission Oranı	
Yoğunluk		Basma Gerilmesi	
Sertlik		Sertlik	

Dateraksa, Sujirete, McCuiston ve Atong yaptıkları çalışmada, seramik kompozit zırh sistemlerinin mekanik özellikleri ile balistik performansları arasındaki ilişkiyi araştırmışlardır. 100x100 mm²'lik Al₂O₃, sinterlenmiş SiC ve sıcak preslenmiş B₄C seramikler ile cam takviyeli polimer kompozit (GRPC) destek plakası bağlamış ve balistik deneylerini gerçekleştirmişlerdir. 800 ve 970 m/s hız aralığında yapılan deneyler sonucunda zırhın alan yoğunluğu ile balistik limitleri arasındaki ilişkiyi açığa çıkarmışlardır. Balistik test sırasında çekilen yüksek hızlı fotoğraflar ile merminin çarpma noktasından penetrasyona geçişini göstermişlerdir. Sonuç olarak tüm zırhların tam penetrasyonunun 200 mikrosaniyede gerçekleştiğini vurgulamışlardır. Ayrıca kırılma konisinin hacminin mekanik özelliklerle nasıl değiştiğini incelemişlerdir. Kırılma toklukları sırasıyla 4, 4,6 ve 2,9 olan

Al_2O_3 , SiC ve B_4C seramiklerde, konik kırılma hacminin toklukla birlikte arttığı sonucuna varmışlardır [35].

Geandier, Denis, Hazotte ve Mocellin, seramik kompozitlerde çatlak yayılımının ana parametrelerini metalik faz boyutuna ve matristeki dağılımına göre tanımlayabilmek amacıyla farklı alümina krom kompozitler üzerinde mikroyapıları ve Hertz çatlaklarını analiz etmişlerdir. Çatlağın mikroskopik analizinden partikül büyüklüğü dağılımının önemini kanıtlamışlardır. Partiküller etrafındaki bölgesel gerilme alanının çatlak üzerindeki etkisini incelemiş, çatlak davranışlarının parçacık şekline ve dağılımına bağlı olarak değiştiğini göstermişlerdir [36].

Kawai, Tsurui, Shindo, Motoyashiki ve Sato, uzay aracı Akatsuki (Gezegen-C) için geliştirilen silikon nitrürlerden yapılmış iticilerin güvenilirliğini araştırmışlardır. Silikon nitrür plakaları, çapları 0,2 ile 0,8 milimetre arasında değişen, paslanmaz çelik ve farklı malzemelerden yapılmış ve 8 km/s hıza sahip kürelere maruz bırakmışlardır. Çeşitli çarpma koşullarında krater derinliği verilerini kullanarak silikon nitrürün penetrasyon denklemlerini belirlemişlerdir. Numunelerin, kraterleşme, kraterleşme ve parçalanma, delinme şeklinde üç tip kırılma şekli gösterdiklerini; bu kırılma kalıplarının, penetrasyon denklemlerinin formları ile iyi kategorize edilebildiğini belirtmişlerdir [37].

Straßburger, çalışmasında şeffaf zırh sistemlerinde kullanılan şeffaf seramiklerin balistik performanslarını değerlendirmiştir. Balistik test sonuçlarını yüksek hızda çekilmiş fotoğraflar ve flaş-radyografiler ile birlikte sunmuştur. Dört farklı seramiğin koruma seviyesini, çelik çekirdekli zırh delici mermiler kullanarak değerlendirmiştir. Testlerden elde ettiği temel sonuçlarda, seramik/cam/polikarbonat hedeflerin koruma seviyesinin ve etkinliğinin 4 mm kalınlığa kadar arttıkça arttığını; verimdeki artışın mermi çekirdeğinin aşınmaya başlaması ve artması ile ilgili olduğunu; 4 ile 8 mm kalınlık aralığında seramik ön katmana sahip hedefler için kalınlık artışıyla verimlilikte belirgin bir artış görülmediğini; sinterlenmiş Alümina ön katmanlı hedeflerin en yüksek korumayı sağladığını, bunu sırasıyla ALON, Spinel ve Safirin izlediğini vurgulamıştır [38].

Appleby-Thomas, Wood, Hameed, Painter ve Fitzmaurice yaptıkları çalışmada, farklı parçacık morfolojilerine sahip toz kompaktlarının kullanımının, sistemlerin balistik tepkisi üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Çalışmada, önceden oluşturulmuş parçalanmış seramik

örnekler iki farklı başlangıç morfolojisine (açısal ve küresel) sahip plazma sprey alümina (Al_2O_3) tozları kullanılarak soğuk preslenmiş ve daha sonra 7.62 zırh delici mermiler yardımıyla balistik tepkileri incelenmiştir. Sunulan sonuçlar arasında (özellikle balistik etkinlik verileri), altta yatan parça morfolojisinin, balistik tepki üzerinde belirgin bir etkiye sahip olduğuna dair açık delil gösterdiğini belirtmişlerdir. Sonuçlara göre, benzer koşullar altında etki eden açısal hammaddeli hedeflerin, küre şeklinde biçimlendirilmiş malzemeye dayanan hedeflere göre; yüklenmeye karşı daha büyük bir direnç gösterdiğini plak etkisi deneylerinden elde edilen verilerle desteklemişlerdir [39].

2.4. Zırh Bileşenleri ve Özellikleri

Seramik önyüzlü kompozit zırh sistemlerinde, seramiklerin arkasına destek katmanı olarak genellikle polimer esaslı kompozit ya da sünek metal katman kullanılmaktadır. Bu katman, belirli bir hıza kadar yavaşlayan ve aşınan merminin artık kinetik enerjisini sönmölenmekte ve oluşan parçacıkların korunacak yüzeye zarar vermesini engellemektedir.

Literatürde yapılan araştırmalara göre ultra yüksek molekül ağırlıklı polietilen (UHMWPE) malzemenin yapıları darbe veya patlama yüklerine karşı güçlendirmek için büyük potansiyele sahip olduğu görölmektedir. Chen, Zheng ve Fang yaptıkları çalışmada, 0,0013 ile $163,78 \text{ s}^{-1}$ arasında değişen gerinim oranlarında UHMWPE fiber laminatların tek yönlü gerilme özelliklerini araştırmak amacıyla statik ve yüksek hızlı gerilme testleri gerçekleştirmişlerdir. UHMWPE elyaf laminatların arıza mekanizmalarını ve modlarını tartışmışlardır. Test sonuçlarına göre mekanik özelliklerin kalınlığa duyarlı olmadığını, ancak gerilme hızıyla birlikte dayanımın ve elastisite modülünün arttığını görmüşlerdir. Farklı gerinim hızlarındaki farklı arıza modlarının kısmen çekme dayanımına katkıda bulunduğı sonucuna varmışlardır. Gerinim oranının UHMWPE lif laminatlarının mekanik özelliklerine etkisinin daha iyi gösterilmesi için malzeme mukavemetinin ve elastikiyet modülünün dinamik artış faktörü için bir dizi ampirik formöl elde etmişlerdir [40].

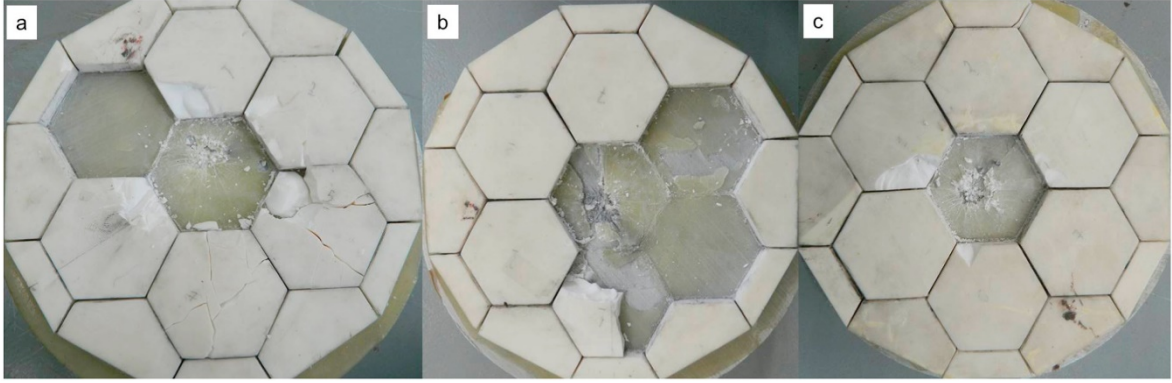
Lässig, Bagusat, Pfändler, Gulde, Heunoske, Osterholz, Stein, Nahme ve May çalışmalarında, düzlemsel plaka darbe testleri ile kalınlık boyunca gerilme mukavemetinin ölçölmesine yönelik bir metodoloji sunmuşlardır. Katmanlı kompozit yapının delaminasyonlarını, yüksek hızlı kamera kayıtlarıyla gözlemlemişlerdir. Darbe testlerini 167 m/s'den 277 m/s'ye kadar hızlarında gerçekleştirmişlerdir. Böylece, UHMWPE kompozit

malzeme için ilk defa dinamik koşullar altında kalınlık boyunca çekme dayanımı ölçmüşlerdir. Sonuç olarak, çekme başarısızlığının, gevrek malzemelerin aksine parçalanma ile değil, katmanlı yapının kısmi delaminasyonlarıyla oluştuğunu vurgulamışlardır [41].

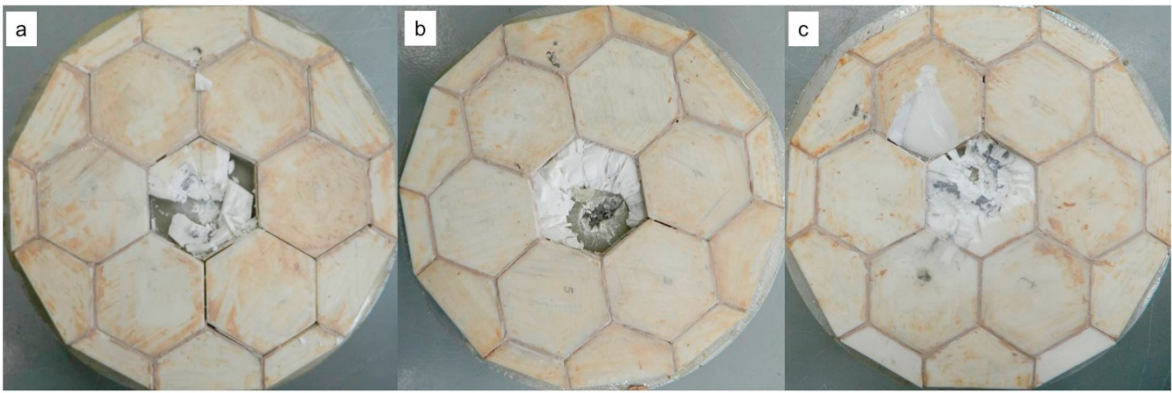
Fallah, Micallef, Langdon, Lee, Curtis ve Louca yaptıkları çalışmada, askeri uygulamalarda çeliğe alternatif olabilecek ultra-yüksek molekül ağırlıklı polietilen (UHMWPE) fiber kompozitlerin patlamaya karşı dinamik tepkilerini incelemişlerdir. Dyneema HB26 panelleri üzerindeki bölgesel hava-patlamalı yükleme testlerinin sonuçları analiz etmişlerdir. Kalıcı deformasyon, delaminasyon, düzlemsel kayma, sınırda burkulma, bölgesel erime ve matris hasarı gibi çeşitli arıza türlerini gözlemlemişlerdir. Deney sonuçlarını, aynı alan yoğunluğundaki yumuşak çelik ve zırh plakalarının sayısal olarak simüle edilmiş tepkileri ile karşılaştırmışlardır [42].

Seramik önyüzlü kompozit zırh sistemleri oluşturulurken, seramikler ve destek plakaları birbirlerine, epoksi reçine ya da polimer bazlı yapıştırıcılar kullanılarak birleştirilmektedir. Epoksi reçineler, iki farklı bileşenin karışması ile başlayan kimyasal reaksiyon sonucu sertleşen malzemelerdir. Epoksi reçineler ve sertleştiricileri değişik viskozitelerde sıvı ya da katı halde bulunabilmektedir.

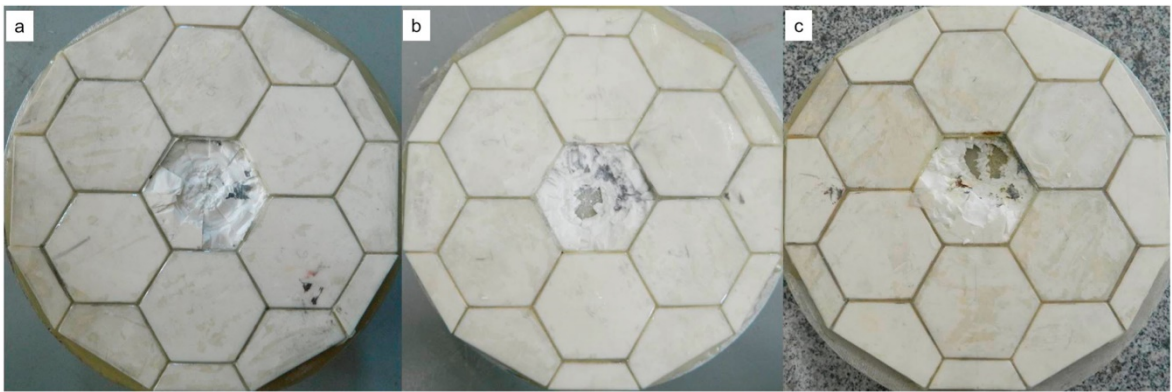
Jiusti, Kammer, Neckel, Lóh, Trindade, Silva, Montedo ve De Noni Jr. yaptıkları çalışmada, seramikler arasındaki dolgu malzemelerinin mozaiklerin balistik performansı üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Dolgu malzemesi olarak sıradan epoksi reçine ve kuvars dolgulu jeopolimer kullanmışlardır ve bu malzemeler sırasıyla 9% ve 20% gerilme dalgası iletimi sağlamışlardır. Kullanılan dolgu malzemesinin seramiklerin genişlemesi sırasında bitişik seramiklere zarar vermesini engellediğinden faydalı olduğunu vurgulamışlardır. Jeopolimer dolgunun, darbeye maruz kalan seramiğin genişlemesini engellese de, bitişik seramiklerin deformasyonuna yol açtığını, bu bakımdan epoksi dolgu malzemesine göre performansının düşük olduğunu; ayrıca, epoksi dolgulu seramiklerin, dolgu içermeyen seramiklerden önemli ölçüde üstün performans sergilediğini de dile getirmişlerdir. Resim 2.1, Resim 2.2 ve Resim 2.3’de Jiusti ve diğerlerinin yaptıkları deneylerde dolgusuz, jeopolimer dolgulu ve epoksi dolgulu numunelerin fotoğrafları görülmektedir. Elde ettikleri sonuçlar doğrultusunda, epoksi reçinelerin, düşük maliyetli, uygulanması kolay ve oldukça rahat kullanılabilir malzeme olmasından ötürü, balistik zırhlarda kullanılan seramik mozaiklerin arasında dolgu malzemesi olarak kullanılmasının uygun olduğu sonucuna varmışlardır [43].



Resim 2.1. Jiusti ve diğerlerinin kullandığı dolgusuz deney numuneleri



Resim 2.2. Jiusti ve diğerlerinin kullandığı jeopolimer dolgulu deney numuneleri



Resim 2.3. Jiusti ve diğerlerinin kullandığı epoksi dolgulu deney numuneleri

Zaera, Sánchez-Sáez, Pérez-Castellanos ve Navarro, seramik karoların metalik bir plakaya yapıştırılmasında kullanılan yapışkan tabakanın, zırhların balistik davranışı üzerindeki etkisini matematiksel ve deneysel olarak analiz edilmişlerdir. Çalışmalarında, poliüretan (yumuşak yapışkan) ve kauçuk modifiyeli epoksi reçine (sert yapışkan) olmak üzere iki tip yapıştırıcı kullanmışlar ve farklı kalınlıklar ele almışlardır. Yapıştırıcıların etkisini kontrol

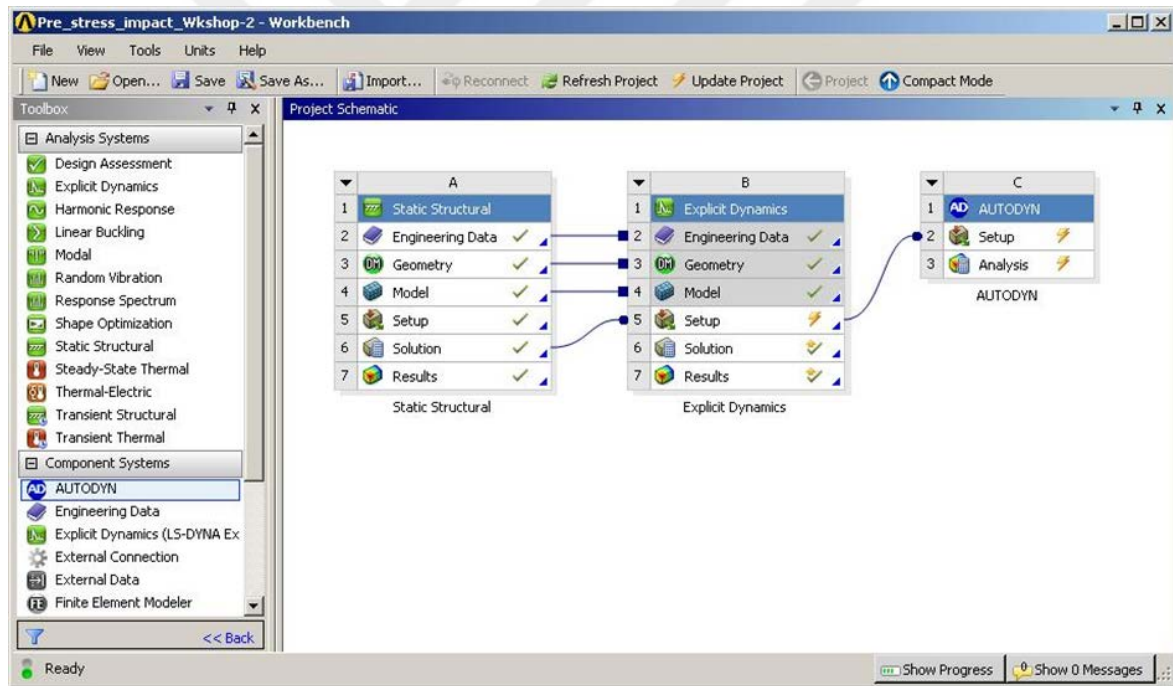
etmek amacıyla tam ölçekli testler yapmışlardır. Ayrıca yaptıkları çalışmada, zırhın performansını en çok etkileyen; seramik malzemenin parçalanma derecesi ve itici enerjinin destek plakasına iletimi olmak üzere iki değişkene odaklanmışlardır. Yüksek hızlı darbe testlerinde bilgilerin ölçülmesi güç olduğundan sayısal bir simülasyon kullanmışlardır. Yaptıkları çalışma, daha kalın yapışkan tabakanın, merminin kinetik enerjisini emmeye yardımcı olan metalik destek plakasının plastik deformasyonuna neden olduğunu göstermiştir. Öte yandan, seramik karonun, yapışkan katmanı kalın olduğunda daha erken parçalandığını belirtmişlerdir. Kalın Seramiklerde kullanılan yapışkan tabakası kalınlığının, özellikle seramik karoların parçalanmasını geciktirmek ve merminin erozyonunu arttırmak için, mümkün olduğunca azaltılması gerektiğini vurgulamışlardır. Ancak bununla birlikte, deneysel sonuçlarda, daha kalın bir yapışkan tabakasının, bitişik seramik karo üzerindeki etkiyi hafifleterek parçalanma riskini azalttığını eklemişlerdir [44].

López-Puente, Arias, Zaera ve Navarro, yapışkan tabaka kalınlığının alümina/alüminyum zırhların verimliliği üzerine etkileri üzerine bir çalışma yapmışlardır. Testlerde, balistik limite yakın ancak zırh delici mermiyi durdurabilecek kalınlıkta paneller ile farklı kalınlığa sahip tabakalar halinde epoksi reçine kullanmışlardır. Yaptıkları testlerle, kalınlığın, hafif koruma tepkisine olan etkisini ortaya koymuşlardır. Deney sonuçlarının analizi için sayısal simülasyonlar gerçekleştirmişlerdir. Yapışkan üzerindeki kayma gerilmesinin darbeden sonra kalın katmanda azaldığını; destek plakası tarafından emilen enerjinin kalın tabakada daha büyük olduğunu, bunun seramikten metale yük aktarımını kolaylaştırdığını; yapışkan tabaka kalınlık değişiminin zırhın verimliliğini etkilediğini ve alümina/alüminyum konfigürasyonu için 0.3 mm'lik kalınlık değerinin optimum olduğunu vurgulamışlardır [45].

2.5. Sayısal Modelleme

Tasarım ve imalatı yapılacak olan ürünler için en çok kullanılan modelleme yöntemi, sonlu elemanlar yöntemidir. Bir ürün geliştirilirken mutlak suretle, standart hale gelmiş ve kullanım alanıyla ilgili uygun testlere tabi tutulmak zorundadır. Bu test yöntemleri bazen çok fazla zaman ve maliyet gerektirmektedir. Böyle durumlarda devreye sayısal hesaplama yöntemleri girmektedir. Bu şekilde sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak prototip ürün imal edilmeden önce davranışı hakkında bilgi sahibi olmayı mümkün hale getirmektedir. Mevcut bir çok sonlu elemanlar yazılımı arasında eski ve ileri derecede kullanılan yazılımlardan bir tanesi ANSYS programıdır. ANSYS yazılımı, mühendislik alanında, mukavemet, titreşim, akışkanlar

mekaniği, ısı transferi ve elektromanyetik alanında fiziğin tüm disiplinleri bir arada kullanılarak simülasyonlar gerçekleştirilebilen genel amaçlı bir sonlu elemanlar yazılımıdır. Bu program, diğer sonlu elemanlar programları gibi, prototipi üretilecek olan bir ürünün testlerinin ya da çalışma şartlarının sanal ortamda simule edilmesini sağlamaktadır. Ayrıca bu program sayesinde yapılan 3 boyutlu analizler neticesinde, yapıların zayıf noktalarının tespiti ve iyileştirilmesi, ömür hesaplarının gerçekleştirilmesi ve muhtemel problemlerin öngörülmesi sağlanmaktadır. ANSYS Workbench arayüzü ise, Resim 2.4'teki modüler yapısı sayesinde sadece ihtiyaç dahilinde alınmak istenilen özelliklerle birlikte haricen CAD ve FEA bağlantı modüllerinin bir arada kullanılmasına olanak sağlamaktadır. ANSYS, hem dışarıdan CAD datalarını alabilmekte hem de içerisindeki ön işleme (preprocessing) imkanları ile geometri oluşturulmasına izin vermekte, yine aynı imkanlar sayesinde sonlu elemanlar modeli yani “mesh” oluşturulabilmektedir [46-50].



Resim 2.4. Ansys Workbench programı arayüzü [46]

ANSYS programında gerçekleştirilen analizler neticesinde elde edilen sonuçlar sayısal ve grafiksel olarak görüntülenebilmektedir. Programdaki temas algoritmalarının çeşitliliği, zamana bağımlı yükleme özellikleri ve malzeme modelleri sayesinde yüksek mühendislik seviyesindeki analizler hızlı ve pratik şekilde gerçekleştirilebilmektedir. ANSYS workbench mechanical ile; Yapısal Analiz (lineer ve lineer olmayan yapısal analizler), Dinamik Analiz (model, harmonik, düzensiz titreşim, esnek ve rijit dinamik analizler), Isı Transfer Analizi

(sıcaklık alanları ve sıcaklığa bağlı ısı akışı, ısıma, taşınım, iletim analizleri), Manyetostatik Analiz (çeşitli manyetik alan analizleri), Elektrik Analizi (motorlar, selenoidler gibi elektrik cihazlarının analizleri) gibi çeşitli analizler yapılabilmektedir. Ayrıca, ANSYS Workbench; LS-DYNA, AUTODYN, FLUENT, CFX, VISTA gibi tek başına da çalıştırılabilen modülleri bünyesinde bulundurmaktadır [46-50].

2.5.1. Ansys Autodyn

Mühendislik simülasyonları; binaların, araçların, askeri ve polis personellerinin hayatta kalma kabiliyetlerini geliştirmede yardımcı olabilmektedir. ANSYS Autodyn programı yardımı ile mühendisler, bir çatışmadaki personeli korumak amacıyla kullanılan aktif zırh sistemlerinin karmaşık yapılarını tasarlayabilmekte ve sanal olarak test edebilmektedirler. Bu yazılım uzaydaki uydularda meydana gelebilecek enkaz çarpışmalarının modellenmesinden, su ve deterjan gibi birçok sıvı depolarının tasarımına kadar bir çok alanda kullanılabilmektedir. ANSYS Autodyn; üç farklı fazdaki ve bunların birbirleriyle olan etkileşimlerini içeren nonlinear modeller için geliştirilmiş bir eksplisit sayısal modelleme yazılımıdır. Çarpışma ve patlama gibi kısa zaman aralığında büyük yüklemeye maruz kalan malzemeleri simüle edebilen bir yazılımdır. Yazılım yardımıyla, eksplisit analiz için ağ oluşturulabilmekte, çeşitli parametrik hesaplamalar yapılabilmekte, başlangıç ve sınır şartları verilebilmekte ve malzeme kütüphanesi kullanılabilmektedir. ANSYS Autodyn programı; Uzay sanayiindeki hiper hızlardaki çarpışmalar, petrol kuyusu açma, kaya delme, meteorit ve asteroit çarpışmaları, yapılar üzerinde patlayıcı yüklemeler, düşme testleri, büyük dinamik yüklemelere maruz malzemeler, koruyucu zırh tasarımları, personel taşıma koruyucuları, patlayıcı yapıların devreden çıkarılması...vb. gibi birçok dinamik simülasyon için kullanılabilmektedir [49-50].

2.5.2. Eksplisit ve implisit analiz yöntemleri

Eksplisit (açık) ve implisit (kapalı) metodlar, zamana bağlı olarak değişen, adi ve kısmi diferansiyel denklemlerin sayısal çözümlerini elde etmeye yarayan yöntemlerdir. Eksplisit yöntemi, sistemin bir sonraki zaman dilimindeki durumunu hesaplarken, sistemin mevcut zamandaki durumunu kullanmaktadır. İmplicit yöntemi ise, hem mevcut hem de gelecek zaman dilimindeki sistem durumlarının ikisini birden kullanarak çözüme ulaşmaktadır. Matematiksel olarak ele alındığında; sistemin mevcut zaman dilimindeki durumu $y(t)$,

sonraki bir zaman dilimindeki durumu ise $y(t+\Delta t)$ olarak alındığında, eksplisit metodlar: $y(t+\Delta t)=F[y(t)]$, implisit metodlar ise: $G[y(t), y(t+\Delta t)]=0$ fonksiyonları kullanılarak çözüme ulaşmaktadırlar. Dolayısıyla görülmektedir ki, implicit metodlar bir çok ekstra hesaplama basamağı (iterasyon) gerektirmekte ve kesin doğruluğa ulaşana kadar tamamlanması uzun sürmektedir. Şartsız kararlı olan implisit metodlar çok daha geniş zaman adımları kullanmaktadırlar. Ancak sürekli tekrar eden denklem sistemlerinin çözümlerini ihtiva etmektedirler. Bu nedenle, her bir adımın yüklenmesindeki hesaplama zamanı diğer yonteme göre daha yüksektir. Explicit metodlar ise çok daha dar zaman adımlarını kullanmaktadırlar ve şartlı olarak kararlıdırlar. Bu da demek oluyor ki; her zaman çözüm için gerekli olan zaman adımı, belirlenmiş olan bir zaman adımından daha küçük olmaktadır. Bu zaman adımı ise en küçük boyutlu elemana ve malzeme özelliklerine bağlı olmaktadır. Ayrıca bu yöntemde, matris çözümü türetilmemekte ve sürekli tekrarlanan iterasyonlara gerek duyulmamaktadır. Bu nedenle, her bir adımın yüklenmesindeki hesaplama zamanı diğer yonteme göre daha düşüktür. İmplicit yönteminin tercih edilme nedeni, bazı problemlerde eksplisit yöntemlerini kullanmaktan daha kolay olmasından kaynaklanmaktadır. Bu tarz problemlerde, geniş zaman adımları kullanan implisit yöntemler sayesinde hesaplama süreleri daha kısa sürmektedir. Bu da göstermektedir ki, eksplisit ve implisit yöntemlerinin kullanım alanları çözülecek problemlerin türlerine göre değişiklik göstermektedir. Örneğin, statik analizlerde genellikle implisit yöntemi kullanılır. Dinamik analizlerde ise ekseri olarak eksplisit yöntemi kullanılmakla birlikte her iki yöntem de tercih edilebilmektedir.

İmplicit ve eksplisit ifadeleri zaman entegrasyonu ile ilişkilendirilmektedir. Örnek olarak, geriye Euler metodu, implicit zaman entegrasyonu düzenlemesine; ileri Euler ya da merkezi farklar metodları ise explicit zaman entegrasyonu düzenlemesine örnek olarak gösterilmektedir. İmplicit zaman entegrasyonu her koşulda sabittir, ancak explicit zaman entegrasyonu için aynı şey geçerli değildir. Çözüm süresinde, zaman aralığının daha küçük olması gereken kritik yerler vardır. Alışlagelmiş ANSYS uygulamaları çok daha geniş zaman adımlarına izin verirken, Autodyn/LS-Dyna tarzı programlar çok daha ufak zaman adımları gerektirmektedir. Bu nedenle, darbe veya kısa süreli olaylar için bu programlar tercih edilmektedir [46-50].

Harewood ve McHugh çalışmalarında, eksplisit metodu kullanan bir sonlu elemanlar yazılımı ile kullanılmak üzere hız bağımlı bir kristal plastisite algoritması geliştirmişlerdir. Geliştirdikleri alt yazılım ve buna eşdeğer implisit versiyonunu, karşılaştırmalı olarak bir

dizi sınır değer problemi analizinde kullanılmışlardır. Çeşitli yükleme koşullarına karşı implisit ve eksplisit çözümlerin uygunluğunu değerlendirmiş ve çoklu işlemcilerin hızlanma oranlarını araştırmışlardır. Çalışmalarının sonucunda, daha basit yükleme koşulları sözkonusu olduğunda implisit yönteminin çözüm süresinin daha kısa olduğunu göstermiş, temas içeren yükleme koşullarında ise, eksplisit yönteminin tercih edilmesi gereken yöntem olduğu kanıtlamışlardır. Eksplisit yöntemi, implisit yöntemiyle çoklu işlemcilerle çözülen analizler için karşılaştırıldığında, paralel çalışma veriminin çok daha yüksek seviyelerde olduğunu belirtmişlerdir. Sonuç olarak, implisit sonlu elemanlar yönteminin, yarı statik problemleri çözerken tercih edilmesi gerektiğini, eksplisit yönteminin ise bazı yükleme koşulları için çözüm yapılırken avantaj sağladığını vurgulamışlardır [51].

Beidokhti, Janssen, Khoshgoftar, Sprengers, Perdahçioğlu, Van den Boogaard ve Verdonschot çalışmalarında, dinamik etkilerin tahminini, olası yakınsaklık problemlerini, hesaplamaların doğruluğunu ve kararlılığını, hesaplama süresindeki farkı ve hesaplama zamanı arasındaki farkı değerlendirmek üzere; diz eklemine biyomekanik analizlerinde statik/dinamik implisit ve dinamik eksplisit çözümleri karşılaştırmışlardır. Diz modelinde iki farklı vücut kitlesi için hızlı, normal ve yavaş yürümenin topuk-vuruş fazını simüle etmişlerdir. Sonuçlarında, dinamik efektin yok sayılmasının eklem hareketini değiştirebileceğini göstermişlerdir. Eksplisit analizlerin, kıkırdak ve menisküs gerilmelerini hesaplama süresinde önemli bir azalma sağladığı için, diz eklemine dinamik yüklemesini yüksek hızlı simülasyonlarda analiz etmek için daha uygun olduğunu belirtmişlerdir [52].

2.5.3. ANSYS Autodyn malzeme modelleri

Autodyn programı içerisinde yer alan malzeme modelleri üç bileşenden oluşmaktadır. Bunlardan birincisi Hal denklemleri, ikincisi mukavemet modeli, üçüncüsü ise hata modelidir. Yüksek gerinme oranlarına, büyük gerilmelere ve yüksek sıcaklıklara maruz malzemelerin, özellikle de metallerin mukavemet davranışları için kullanılan model genellikle Johnson Cook malzeme modelidir. Yüksek basınçlar, büyük kesme kuvvetleri ve yüksek gerinim hızları etkisindeki seramik, cam gibi kırılabilir malzemeleri modellemede tercih edilen model ise Johnson Holmquist malzeme modelidir. Bu modelin eksplisit dinamik sistemlerde, devamlı (JH2) ve bölünmüş (JH1) olmak üzere iki formu bulunmaktadır. Bu modeller dışında, ANSYS Autodyn programı eksplisit dinamik

modülünde kullanılacak malzemenin türüne göre tercih edilebilecek malzeme modelleri de bulunmaktadır [46-47].

Epoksi Reçine için malzeme modeli

Literatürde mevcut çalışmalarda, dolgu ve yapıştırıcı malzeme olarak kullanılan epoksi reçine modeli için Mie-Gruneisen hal denklemleri ve Von Mises mukavemet modeli kullanılmaktadır [53]. Mie-Gruneisen hal denklemi genel formu ile;

$$P = P_H + \Gamma \rho [e - e_H] \quad (2.1)$$

şeklinde tanımlanmaktadır [47, 53]. Burada P basınç, Γ Gruneisen faktörüdür. P_H ve e_H fonksiyonları ise,

$$P_H = \frac{\rho_0 C_1^2 \mu (1+\mu)}{[1+(S_1-1)\mu]^2} \quad (2.2)$$

$$e_H = \frac{P_H}{2\rho_0} \left(\frac{\mu}{1+\mu} \right) \quad (2.3)$$

şeklinde tanımlanmaktadır. Buradaki C_1 ve S_1 parametreleri epoksi reçine için şok parçacık hız düzlemindeki uyumlu şok Hugonoit eğrisinden belirlenmektedir [53]. Von Mises mukavemet modelinde ise, akma kriterine göre;

$$2\sigma_Y^2 = (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \quad (2.4)$$

denkleminde yola çıkmaktadır [53-54]. Burada, σ_1 , σ_2 ve σ_3 asal gerilmeler; σ_Y ise akma gerilmesidir.

Çelik için malzeme modeli

Genellikle yüksek gerilmelere maruz kalan metaller için kullanılan malzeme modeli Johnson-Cook (JC) modelidir. Bu model bünyesinde, pekleştirme, gerinim hızı etkileri ve sıcaklık değişimlerini barındırmaktadır. Genel olarak kullanılan denklem;

$$\sigma_Y = [A + B(\varepsilon_p)^n] \left[1 + C \ln\left(\frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_0}\right) \right] \left[1 - \left(\frac{t-t_0}{t_m-t_0}\right)^m \right] \quad (2.5)$$

şeklindedir. Burada A statik akma dayanımı, B pekleştirme sabiti, C gerinim hızı sabiti, n pekleştirme üsteli ve m ısı yumuşama katsayısı olmak üzere beş malzeme sabiti bulunmaktadır. Ayrıca, t_0 referans sıcaklık, t_m ergime sıcaklığı, ε_p eşdeğer plastik gerinim, $\dot{\varepsilon}_p$ ise referans gerinim hızıdır [53, 55, 56].

2.6. Seramik Malzeme Modeli ve Davranışı

Seramikler, camlar ve benzer kırılğan malzemelerin, yüksek basınç ve yüksek gerinim hızları etkisinde kaldığı analizlerde ekseri tercih edilen malzeme modeli Johnson Holmquist modelidir. Bu mukavemet modelinin sürekli (JH2) ve bölünmüş (JH1) olarak iki ayrı formu bulunmaktadır. Bu iki form da lineer ya da polinom hal denklemleriyle birlikte kullanılabilir. Kırılğan malzemenin dayanımı, boyutsuz analitik fonsiyona bağlı olarak, hasarsız dayanım, kırılma dayanımı, gerinim hızı ve hasar'ın varyasyonlarıdır.

Johnson ve Holmquist'in, orjinal Johnson Holmquist (JH1) malzeme modelini oluşturduktan kısa bir süre sonra, malzeme modelinin bazı malzemelerin yükleme esnasında yavaş yavaş yumuşamasına izin vermemesinden dolayı kaygıları oluşmuştur. Ayrıca bazı uygulamalarda sonuçların malzeme modelindeki sabitlere karşı fazla hassas olduğunu, bu sabitleri kesin olarak belirlemenin de zor olduğunu belirtmişlerdir. Son olarak, hasarlı malzeme ($D=1,0$) ile hasara uğramamış malzeme ($D<1,0$) arasındaki sıçrama koşullarının, Euler kodları için bazı problemlere yol açtığını; malzemenin kırılma oluştuktan sonra kendini iyileştirme eğiliminde olduğunu görmüşlerdir. Bu kaygıları gidermek amacıyla ikinci bir model (JH2) geliştirmişlerdir [57].

JH2 malzeme modeli, JH1 modeline çok benzese de bazı farklılıklar mevcuttur. Hasar başladığında ($D>0$) ve plastik gerilme arttıkça kademeli yumuşama oluşmaktadır. JH1 modelinde ise malzeme kırıldığında ($D=1$) yumuşama anlık meydana gelmektedir. Dayanım ve basınç, Hugoniot elastik limitin (HEL) dayanım ve basınç bileşenleri ile normalize edilmekte ve boyutsuz olmaları sağlanmaktadır. Bu özellik, malzemelerin sabitleri ile ilgili yeterli veri tabanına sahip olunmadığında, sabitleri tahmin ederken fayda sağlamaktadır. Ayrıca, dayanım ve hasar, basınç ve diğer değişkenlerin analitik fonksiyonlarından meydana

gelmektedir. Bu da, sabitlerin parametrik olarak, sistematik bir şekilde değiştirilebilmesine olanak tanımaktadır [57].

Johnson ve Holmquist'in Şekil 2.9'da görüldüğü gibi tanımlanan JH2 malzeme modeline göre, normalize edilmiş eşdeğer gerilme;

$$\sigma^* = \sigma_i^* - D(\sigma_i^* - \sigma_f^*) \quad (2.6)$$

şeklinde tanımlanmaktadır. Burada, σ_i^* normalize edilmiş hasarsız eşdeğer gerilme, σ_f^* normalize edilmiş kırılma gerilmesi, D ise hasarı ($0 < D < 1,0$) simgelemektedir [57]. Normalize edilmiş gerilmelerin genel formu,

$$\sigma^* = \sigma / \sigma_{HEL} \quad (2.7)$$

şeklinde dir. Burada σ gerçek eşdeğer gerilme, σ_{HEL} ise Hugoniot elastik limitteki eşdeğer gerilmedir. Johnson ve Holmquist, normalize edilmiş hasarsız ve kırılma gerilmelerini şu şekilde formülize etmektedirler [57];

$$\sigma_i^* = A(P^* + T^*)^N (1 + C \cdot \ln \dot{\epsilon}^*) \quad (2.8)$$

$$\sigma_f^* = B(P^*)^M (1 + C \cdot \ln \dot{\epsilon}^*) \quad (2.9)$$

Çalışmada ayrıca normalize edilmiş kırılma dayanımının $\sigma_f^* \leq SFMAX$ şeklinde limitlendirilebileceği vurgulanmıştır. P^* , Hugoniot elastik limitteki basınç (P_{HEL}) ile normalize edilmiş basınçtır. T^* ise yine P_{HEL} ile normalize edilmiş maksimum çekme hidrostatik basıncıdır. A, B, C, M, N ve SFMAX ise malzeme sabitleridir. Boyutsuz gerinim hızı,

$$\dot{\epsilon}^* = \dot{\epsilon} / \dot{\epsilon}_0 \quad (2.10)$$

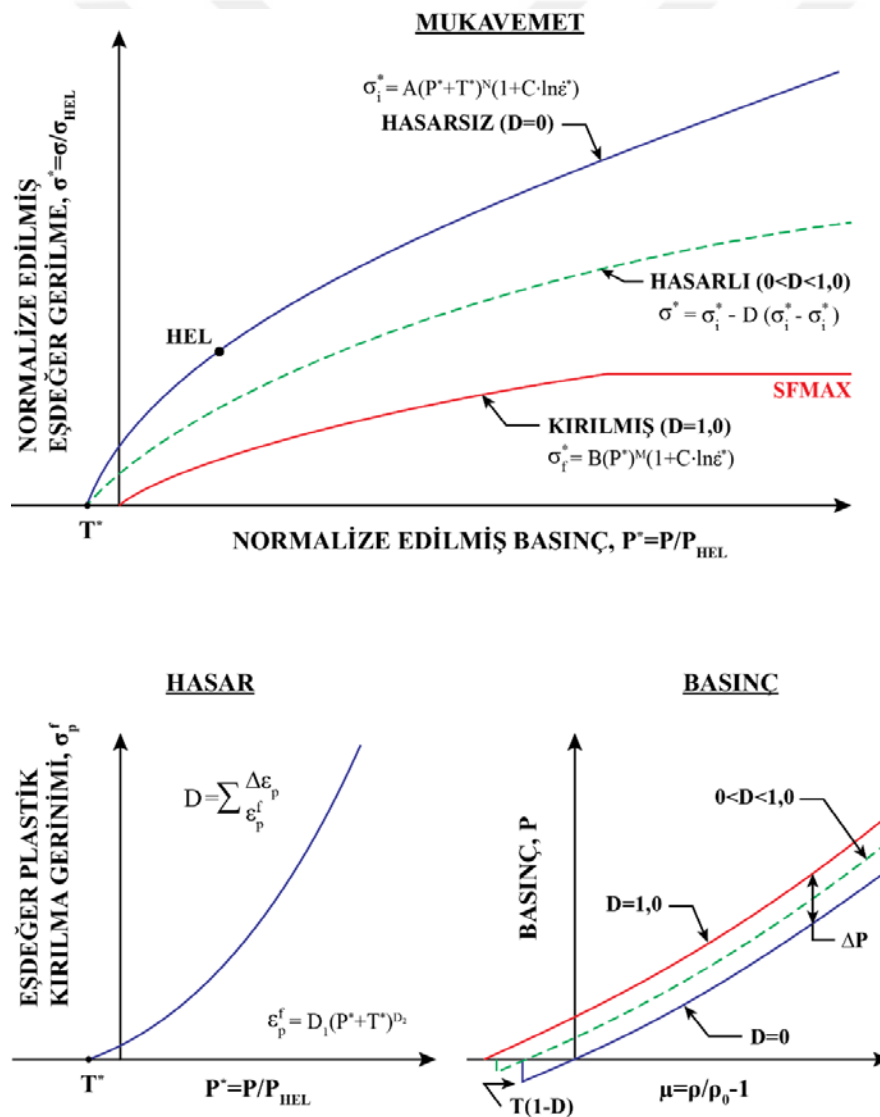
şeklinde tanımlanmaktadır [57]. Bu malzeme modelinde kırılma hasarı ise, eşitlik 2.11'de görüldüğü gibi JH-1 ve Johnson Cook malzeme modellerindekine benzer şekilde biriktirilmektedir.

$$D = \sum \Delta \varepsilon^P / \varepsilon_f^P \quad (2.11)$$

burada $\Delta \varepsilon^P$ integrasyon döngüsü sırasındaki plastik gerinim ve ε_f^P sabit P basıncı altında kırılma için gerekli plastik gerinimdir. ε_f^P 'nin açılımı ise şu şekilde belirtilmiştir [57];

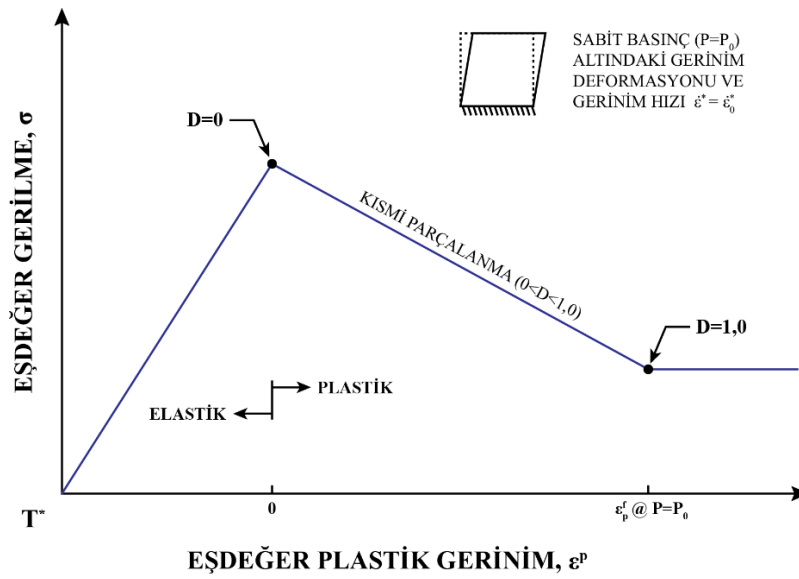
$$\varepsilon_f^P = D_1 (P^* + T^*)^{D_2} \quad (2.12)$$

burada, D_1 ve D_2 malzeme sabitleridir. P^* ve T^* ise, eşitlik 2.8 ve 2.9'da tanımlanan değerlerdir.



Şekil 2.9. JH2 malzeme modelinin tanımı [57]

Johnson ve Holmquist, hasar ve kırılmaya ilişkin bir fiziksel açıklamayı Şekil 2.10'da görüldüğü gibi tanımlamaktadırlar. Malzeme sabit bir basınç altında tutulduktan sonra, sabit gerilme hızında gerilme deformasyonuna maruz bırakılırsa, malzemenin plastik olarak akmaya başlamasıyla birlikte hasarın birikmeye başladığını belirtmektedirler ($\sigma = \sigma_i$ 'de). Malzemenin daha sonra yumuşamaya başladığını ve tamamen hasar gördüğünde ($D = 1,0$) ise, plastik gerinim artsa da mukavemetin azalmadığını vurgulamışlardır. Ayrıca, bu testleri yeterince yüksek basınçlarla gerçekleştirmek genellikle mümkün olmadığı için hasar fonksiyonları ve kırılma mukavemetini diğer verilerden çıkardıklarını belirtmişlerdir [57].



Şekil 2.10. Hasar ve kırılmanın fiziksel tanımı

Johnson ve Holmquist malzeme modeli (JH2) yalnızca kırılğan malzemelerde kullanılan bir modeldir. Katı gövdelerde uygulanan bu malzeme modeli, bulk sabiti sıfırdan büyükse, lineer elastisite ya da polinom hal denklemleri ile birlikte kullanılabilir. Polinom hal denklemlerinde hidrostatik basınç şu formu almaktadır [55];

$$P = K\mu + K_2\mu^2 + K_3\mu^3 \quad (2.13)$$

Burada K bulk modülü, K_2 ve K_3 malzeme basınç sabitleri, μ ise sıkıştırma faktörüdür. Sıkıştırma faktörü, yoğunluk ve sıfır basınç altındaki yoğunluk değerlerinde elde edilir.

$$\mu = \frac{\rho}{\rho_0} - 1 \quad (2.14)$$

Malzemelerin Bulk modülü ve kesme modülü eşitlik 2.13 ve eşitlik 2.14’de görüldüğü gibi elastisite modülü ve poisson oranı kullanılarak hesaplanabilmektedir [58].

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)} \quad (2.15)$$

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (2.16)$$

ANSYS Autodyn programında kullanılan Johnson ve Holmquist malzeme modeli için program girdi değerleri Çizelge 2.6’da, yine bu model için ayarlanabilir sonuç değişkenleri ise Çizelge 2.7’de gösterilmiştir.

Çizelge 2.6. Johnson ve Holmquist malzeme modeli (JH2) girdi değerleri

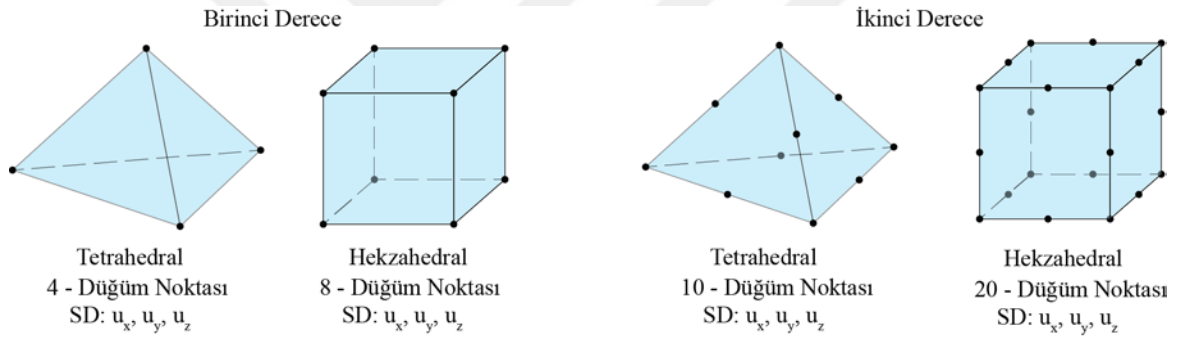
Özellik	Sembol	Birim
Yoğunluk	ρ	Kg/m ³
Bulk Modülü	K	GPa
Kesme Modülü	G	GPa
Hugoniot Elastik Limit	HEL	GPa
Hidrostatik Çekme Limiti	T	MPa
Hasarsız Dayanım Sabiti	A	-
Hasarsız Dayanım Üsteli	N	-
Gerinim Hızı Sabiti	C	-
Kırılma Dayanım Sabiti	B	-
Kırılma Dayanım Üsteli	M	-
Maksimum Kırılma Dayanım Oranı	SFMAX	-
Hasar Sabiti	D1	-
Hasar Üsteli	D2	-
Hacim Artış Faktörü	β	-
Basınç Sabiti 1	K1	-
Basınç Sabiti 2	K2	-

Çizelge 2.7. JH2 malzeme modeli ayarlanabilir sonuç değişkenleri

Değişken	Açıklama
EFF_PL_STN	Etkin plastik gerinim
EFF_PL_STN_RATE	Etkin plastik gerinim hızı
PRESSURE	Basınç
DAMAGE	Hasar
STATUS	Malzeme Durumu
PRESS_BULK	Genişleme Basıncı
ENERGY_DAM	Hacim Artışını etkileyen hasar enerjisi

2.7. Sonlu Elemanlar ve Ağ modeli

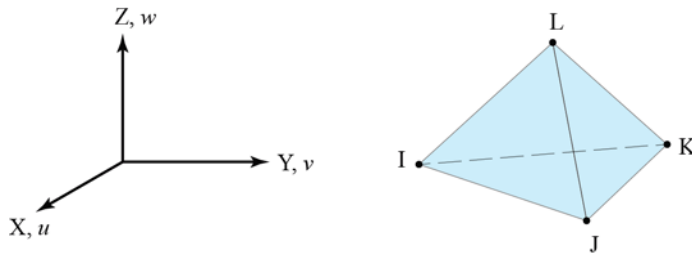
Üç boyutlu (3B) katı cisimler bir çok birbirine bitişik elemana bölünebilmektedirler. Bu elemanların her birine “3B katı eleman” denilmektedir. 3B katı elemanlar, şekillerine göre bitişik olduğu diğer elemanlarla kenar ve köşelerinden temas halindedirler. Elemanların birbirleriyle temasta bulundukları köşe noktalarına düğüm noktaları (nod) adı verilir. ANSYS programı, bünyesinde tek boyutlu, iki boyutlu ve üç boyutlu olarak 150’ye yakın eleman tipi barındırmaktadır. Ancak yapısal üç boyutlu katı cisimler için, tetrahedral ve hekzahedral olmak üzere iki çeşit 3B katı eleman tanımlanabilmektedir [59, 60]. Elemanlar üzerindeki her bir düğüm noktası, u , v ve w olmak üzere; x , y ve z yönünde üç yer değiştirme bileşenine sahiptir. Elemanların serbestlik derecesi üçtür. Şekil 2.11’de yapısal üç boyutlu katılar için kullanılan tetrahedral ve hekzahedral elemanlar görülmektedir.



Şekil 2.11. Yapısal 3B katı eleman şekilleri ve serbestlik dereceleri

Dört Nodlu Tetrahedral Eleman

Şekil 2.12’de görülen dört düğüm noktalı tetrahedral eleman tipi, katı mekanik problemlerinde kullanılan en basit üç boyutlu eleman tipidir.



Şekil 2.12. Dört nodlu tetrahedral eleman

Dört nodu, dört yüzeyi ve altı kenarı bulunmaktadır. Her bir nod, x, y, z eksenleri doğrultusunda üç serbestlik derecesine sahiptir. Bu yer değiştirmeler sırasıyla u, v ve w olarak yazılırsa; yer değiştirme alanı,

$$\begin{aligned} u &= C_{11} + C_{12}X + C_{13}Y + C_{14}Z \\ v &= C_{21} + C_{22}X + C_{23}Y + C_{24}Z \\ w &= C_{31} + C_{32}X + C_{33}Y + C_{34}Z \end{aligned} \quad (2.17)$$

şeklinde tanımlanmaktadır [59]. Noktasal yer değiştirme, I nodu ele alındığında, $X=X_I$, $Y=Y_I$, ve $Z=Z_I$ 'da $u=u_I$ olmaktadır. Bunu her bir nod ve her yer değiştirme için türettiğimizde, eşitlik 2.18'de görülen 12 denklem ve 12 bilinmeyen elde edilmektedir.

$$\begin{aligned} u_I &= C_{11} + C_{12}X_I + C_{13}Y_I + C_{14}Z_I \\ u_J &= C_{11} + C_{12}X_J + C_{13}Y_J + C_{14}Z_J \\ &\vdots \\ w_L &= C_{31} + C_{32}X_L + C_{33}Y_L + C_{34}Z_L \end{aligned} \quad (2.18)$$

Bilinmeyen C sabitlerini çözmek için, sonuçlar 2.17 eşitliğinde yerine koyulup parametreler tekrar gruplanırsa;

$$\begin{aligned} u &= S_1u_I + S_2u_J + S_3u_K + S_4u_L \\ v &= S_1v_I + S_2v_J + S_3v_K + S_4v_L \\ w &= S_1w_I + S_2w_J + S_3w_K + S_4w_L \end{aligned} \quad (2.19)$$

elde edilir ve şekil fonksiyonu,

$$\begin{aligned} S_1 &= \frac{1}{6V} (a_I + b_I X + c_I Y + d_I Z) \\ S_2 &= \frac{1}{6V} (a_J + b_J X + c_J Y + d_J Z) \\ S_3 &= \frac{1}{6V} (a_K + b_K X + c_K Y + d_K Z) \\ S_4 &= \frac{1}{6V} (a_L + b_L X + c_L Y + d_L Z) \end{aligned} \quad (2.20)$$

şeklinde tanımlanabilmektedir [59]. Tetrahedral elemanın hacmi (V) ise;

$$6V = \det \begin{vmatrix} 1 & X_I & Y_I & Z_I \\ 1 & X_J & Y_J & Z_J \\ 1 & X_K & Y_K & Z_K \\ 1 & X_L & Y_L & Z_L \end{vmatrix} \quad (2.21)$$

şeklinde hesaplanır. a_I, b_I, c_I, d_I terimleri;

$$a_I = \det \begin{vmatrix} X_J & Y_J & Z_J \\ X_K & Y_K & Z_K \\ X_L & Y_L & Z_L \end{vmatrix}, \quad b_I = -\det \begin{vmatrix} 1 & Y_J & Z_J \\ 1 & Y_K & Z_K \\ 1 & Y_L & Z_L \end{vmatrix} \quad (2.22)$$

$$c_I = \det \begin{vmatrix} X_J & 1 & Z_J \\ X_K & 1 & Z_K \\ X_L & 1 & Z_L \end{vmatrix}, \quad d_I = -\det \begin{vmatrix} X_J & Y_J & 1 \\ X_K & Y_K & 1 \\ X_L & Y_L & 1 \end{vmatrix}$$

şeklinde hesaplanır. $a_J, b_J, c_J, d_J, \dots, d_L$ terimleri hesaplanırken örnek olarak,

$$a_J = \det \begin{vmatrix} X_K & Y_K & Z_K \\ X_L & Y_L & Z_L \\ X_I & Y_I & Z_I \end{vmatrix}$$

teriminde görüldüğü gibi, sağ el kuralı kullanılarak I, J, K, L alt indisleri döndürülmekte ve benzer determinantlar oluşturulmaktadır [AA]. Dört nodlu tetrahedral eleman kullanılan üç boyutlu katı problemlerin çözümünde altı bağımsız gerilme ve altı bağımsız gerinim bileşeni kullanılmaktadır.

$$[\boldsymbol{\sigma}]^T = [\sigma_{xx} \quad \sigma_{yy} \quad \sigma_{zz} \quad \tau_{xy} \quad \tau_{yz} \quad \tau_{xz}] \quad (2.23)$$

$$[\boldsymbol{\epsilon}]^T = [\epsilon_{xx} \quad \epsilon_{yy} \quad \epsilon_{zz} \quad \gamma_{xy} \quad \gamma_{yz} \quad \gamma_{xz}]$$

burada $\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}$ normal gerilme; $\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{xz}$ kayma gerilmesi; $\epsilon_{xx}, \epsilon_{yy}, \epsilon_{zz}$ normal gerinim; $\gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{xz}$ kayma gerinimi bileşenleridir. Ayrıca yer değiştirme vektörü $\boldsymbol{\delta}$ kartezyen bileşenleri ile,

$$\boldsymbol{\delta} = u(x, y, z)\mathbf{i} + v(x, y, z)\mathbf{j} + w(x, y, z)\mathbf{k} \quad (2.24)$$

şeklinde yazılmaktadır. Gerinim ve yer değiştirme arasındaki ilişki ise,

$$\begin{aligned}
\varepsilon_{xx} &= \frac{\partial u}{\partial x} & \varepsilon_{yy} &= \frac{\partial v}{\partial y} & \varepsilon_{zz} &= \frac{\partial w}{\partial z} \\
\gamma_{xy} &= \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} & \gamma_{yz} &= \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} & \gamma_{xz} &= \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x}
\end{aligned} \tag{2.25}$$

şeklinde tanımlanmaktadır. Bu eşitlikler matris formunda yazıldığında,

$$\{\boldsymbol{\varepsilon}\} = \mathbf{L}\mathbf{U} \tag{2.26}$$

olmaktadır. $\mathbf{L}$, lineer diferansiyel operatörüdür. $\{\boldsymbol{\varepsilon}\}$ ve $\mathbf{L}\mathbf{U}$ ise şu şekildedir:

$$\{\boldsymbol{\varepsilon}\} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \end{Bmatrix} \quad \text{ve} \quad \mathbf{L}\mathbf{U} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial y} \\ \frac{\partial w}{\partial z} \\ \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \\ \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \end{Bmatrix}$$

Genelleştirilmiş Hooke Kanunlarına göre, gerilme gerinim arasındaki bağıntılar;

$$\begin{aligned}
\varepsilon_{xx} &= \frac{1}{E} [\sigma_{xx} - \nu(\sigma_{yy} + \sigma_{zz})] & \gamma_{xy} &= \frac{1}{G} \tau_{xy} \\
\varepsilon_{yy} &= \frac{1}{E} [\sigma_{yy} - \nu(\sigma_{xx} + \sigma_{zz})] & \gamma_{yz} &= \frac{1}{G} \tau_{yz} \\
\varepsilon_{zz} &= \frac{1}{E} [\sigma_{zz} - \nu(\sigma_{xx} + \sigma_{yy})] & \gamma_{zx} &= \frac{1}{G} \tau_{zx}
\end{aligned} \tag{2.27}$$

şeklinde tanımlanmaktadır. Bu ifadeler matris formunda ise;

$$\{\boldsymbol{\sigma}\} = [\boldsymbol{\nu}]\{\boldsymbol{\varepsilon}\} \tag{2.28}$$

olarak yazılmaktadır. Burada $\{\boldsymbol{\sigma}\}$ ve $[\boldsymbol{\nu}]$,

$$\{\boldsymbol{\sigma}\} = \begin{Bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{xz} \end{Bmatrix} \quad \text{ve} \quad [\mathbf{v}] = \frac{E}{1+\nu} \begin{bmatrix} \frac{1-\nu}{1-2\nu} & \frac{\nu}{1-2\nu} & \frac{\nu}{1-2\nu} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu}{1-2\nu} & \frac{1-\nu}{1-2\nu} & \frac{\nu}{1-2\nu} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu}{1-2\nu} & \frac{\nu}{1-2\nu} & \frac{1-\nu}{1-2\nu} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2} \end{bmatrix}$$

şeklindedir. Üç eksenli yük altındaki bir katı için gerinim enerjisi Λ ,

$$\Lambda^{(e)} = \frac{1}{2} \int_V (\sigma_{xx} \varepsilon_{xx} + \sigma_{yy} \varepsilon_{yy} + \sigma_{zz} \varepsilon_{zz} + \tau_{xy} \gamma_{xy} + \tau_{yz} \gamma_{yz} + \tau_{zx} \gamma_{zx}) dV \quad (2.29)$$

Şeklinde tanımlanmaktadır [59]. Matris formunda yazıldığında

$$\Lambda^{(e)} = \frac{1}{2} \int_V [\boldsymbol{\sigma}]^T \{\boldsymbol{\varepsilon}\} dV \quad (2.30)$$

olmaktadır. Hooke Kanunu'na göre gerilmeler, gerinim cinsine çevrilip eşitlik tekrar yazıldığında;

$$\Lambda^{(e)} = \frac{1}{2} \int_V \{\boldsymbol{\varepsilon}\}^T [\mathbf{v}] \{\boldsymbol{\varepsilon}\} dV \quad (2.31)$$

formunu almaktadır. Tetrahedral elemanın dört nodu olduğu ve her bir nodun x, y ve z yönünde üç yer değiştirmeye sahip oldukları dikkate alındığında, şekil fonksiyonu şu şekilde yazılabilmektedir [59]:

$$\{\mathbf{u}\} = [\mathbf{S}]\{\mathbf{U}\} \quad (2.32)$$

burada,

$$\{\mathbf{u}\} = \begin{Bmatrix} u \\ v \\ w \end{Bmatrix}$$

$$[\mathbf{S}] = \begin{bmatrix} S_1 & 0 & 0 & S_2 & 0 & 0 & S_3 & 0 & 0 & S_4 & 0 & 0 \\ 0 & S_1 & 0 & 0 & S_2 & 0 & 0 & S_3 & 0 & 0 & S_4 & 0 \\ 0 & 0 & S_1 & 0 & 0 & S_2 & 0 & 0 & S_3 & 0 & 0 & S_4 \end{bmatrix}$$

$$\{U\} = \begin{Bmatrix} u_I \\ v_I \\ w_I \\ u_j \\ v_j \\ w_j \\ u_K \\ v_K \\ w_K \\ u_L \\ v_L \\ w_L \end{Bmatrix}$$

Yer değiştirme alanının, gerinim yer değiştirme ilişkilendirmelerine göre trevleri alındığında,

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial S_1}{\partial x} & 0 & 0 & \frac{\partial S_2}{\partial x} & 0 & 0 & \frac{\partial S_3}{\partial x} & 0 & 0 & \frac{\partial S_4}{\partial x} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial S_1}{\partial y} & 0 & 0 & \frac{\partial S_2}{\partial y} & 0 & 0 & \frac{\partial S_3}{\partial y} & 0 & 0 & \frac{\partial S_4}{\partial y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial S_1}{\partial z} & 0 & 0 & \frac{\partial S_2}{\partial z} & 0 & 0 & \frac{\partial S_3}{\partial z} & 0 & 0 & \frac{\partial S_4}{\partial z} \\ \frac{\partial S_1}{\partial y} & \frac{\partial S_1}{\partial x} & 0 & \frac{\partial S_2}{\partial y} & \frac{\partial S_2}{\partial x} & 0 & \frac{\partial S_3}{\partial y} & \frac{\partial S_3}{\partial x} & 0 & \frac{\partial S_4}{\partial y} & \frac{\partial S_4}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial S_1}{\partial z} & \frac{\partial S_1}{\partial y} & 0 & \frac{\partial S_2}{\partial z} & \frac{\partial S_2}{\partial y} & 0 & \frac{\partial S_3}{\partial z} & \frac{\partial S_3}{\partial y} & 0 & \frac{\partial S_4}{\partial z} & \frac{\partial S_4}{\partial y} \\ \frac{\partial S_1}{\partial z} & 0 & \frac{\partial S_1}{\partial x} & \frac{\partial S_2}{\partial z} & 0 & \frac{\partial S_2}{\partial x} & \frac{\partial S_3}{\partial z} & 0 & \frac{\partial S_3}{\partial x} & \frac{\partial S_4}{\partial z} & 0 & \frac{\partial S_4}{\partial x} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_I \\ v_I \\ w_I \\ u_j \\ v_j \\ w_j \\ u_K \\ v_K \\ w_K \\ u_L \\ v_L \\ w_L \end{Bmatrix} \quad (2.33)$$

şeklini almaktadır [59]. Eşitlik 2.20 kullanılarak şekil fonksiyonu için yerine koyulduğunda ve çözüldüğünde,

$$\{\varepsilon\} = [B]\{U\} \quad (2.34)$$

elde edilmektedir. Buradaki $[B]$ matrisi,

$$[B] = \frac{1}{6V} \begin{bmatrix} b_I & 0 & 0 & b_j & 0 & 0 & b_K & 0 & 0 & b_L & 0 & 0 \\ 0 & c_I & 0 & 0 & c_j & 0 & 0 & c_K & 0 & 0 & c_L & 0 \\ 0 & 0 & d_I & 0 & 0 & d_j & 0 & 0 & d_K & 0 & 0 & d_L \\ c_I & b_I & 0 & c_j & b_j & 0 & c_K & b_K & 0 & c_L & b_L & 0 \\ 0 & d_I & c_I & 0 & d_j & c_j & 0 & d_K & c_K & 0 & d_L & c_L \\ d_I & 0 & b_I & d_j & 0 & b_j & d_K & 0 & b_K & d_L & 0 & b_L \end{bmatrix} \quad (2.35)$$

şeklindedir. Hacim V ve b, c, d terimleri eşitlik 2.21 ve 2.22'den hesaplanmaktadır [59]. Buna göre gerinim enerji denklemi yeniden yazıldığında,

$$\Lambda^{(e)} = \frac{1}{2} \int_V [\mathbf{U}]^T [\mathbf{B}]^T [\mathbf{v}] [\mathbf{B}] [\mathbf{U}] dV \quad (2.36)$$

olmaktadır. Eşitliğin her iki tarafın da yer değiştirmeye göre difansiyeli alındığında,

$$\frac{\partial \Lambda^{(e)}}{\partial U_k} = \frac{\partial}{\partial U_k} \left(\frac{1}{2} \int_V [\mathbf{U}]^T [\mathbf{B}]^T [\mathbf{v}] [\mathbf{B}] [\mathbf{U}] dV \right), \quad k=1, 2, 3, \dots, 12 \quad (2.37)$$

elde edilmektedir ve çözüldüğünde, $[\mathbf{K}]^{(e)}\{\mathbf{U}\}$ ifadesi türetilmektedir ve integrali alındığında katılık matrisinin ifadesi;

$$[\mathbf{K}]^{(e)} = V[\mathbf{B}]^T [\mathbf{v}] [\mathbf{B}] \quad (2.38)$$

olmaktadır [59]. Tetrahedral bir eleman için yük matrisi, 12x1 matris formundadır. Yük matrisi,

$$\{\mathbf{F}\}^{(e)} = \int_A [\mathbf{S}]^T \{\mathbf{p}\} dA, \quad \{\mathbf{p}\} = \begin{Bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{Bmatrix} \quad (2.39)$$

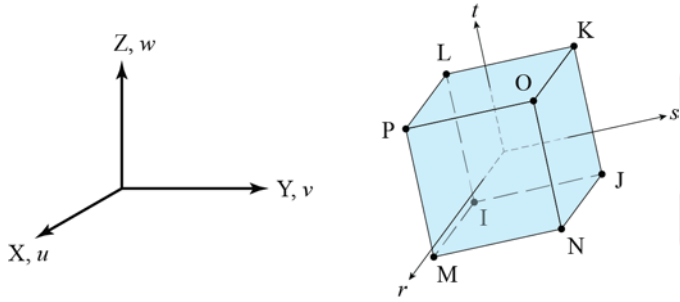
eşitliğinden hesaplanmaktadır. A yayılı yük bileşenlerinin etkisinde olan tetrahedral elemanın yüzeylerinin alanıdır. Örnek olarak yayılı yükün, elemanın I-J-K yüzeyine etki ettiği düşünüldüğünde yük matrisi,

$$\{\mathbf{F}\}^{(e)} = \frac{A_{I-J-K}}{3} \begin{Bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \\ p_x \\ p_y \\ p_z \\ p_x \\ p_y \\ p_z \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (2.40)$$

formunu almaktadır. Diğer yüzeylere etki eden yük matrisleri de benzer şekilde elde edilmektedir [59].

Sekiz Nodlu Hekzahedral Eleman

Şekil 2.13'te görülen tipik sekiz nodlu hekzahedral eleman tipi, katı mekanik problemlerinde kullanılan ikinci en basit üç boyutlu eleman tipidir. Sekiz nodun her biri x, y, z eksenleri doğrultusunda üç serbestlik derecesine sahiptirler.



Şekil 2.13. Sekiz düğüm noktalı hekzahedral eleman

Elemanın, nokta yer değiştirmeleri ve şekil fonksiyonu cinsinden yerdeğiştirme alan fonksiyonları aşağıdaki şekilde yazılmaktadır [59]:

$$\begin{aligned}
 u = & \frac{1}{8} [u_I(1-s)(1-t)(1-r) + u_J(1+s)(1-t)(1-r)] \\
 & + \frac{1}{8} [u_K(1+s)(1+t)(1-r) + u_L(1-s)(1+t)(1-r)] \\
 & + \frac{1}{8} [u_M(1-s)(1-t)(1+r) + u_N(1+s)(1-t)(1+r)] \\
 & + \frac{1}{8} [u_O(1+s)(1+t)(1+r) + u_P(1-s)(1+t)(1+r)]
 \end{aligned} \tag{2.41}$$

$$\begin{aligned}
 v = & \frac{1}{8} [v_I(1-s)(1-t)(1-r) + v_J(1+s)(1-t)(1-r)] \\
 & + \frac{1}{8} [v_K(1+s)(1+t)(1-r) + v_L(1-s)(1+t)(1-r)] \\
 & + \frac{1}{8} [v_M(1-s)(1-t)(1+r) + v_N(1+s)(1-t)(1+r)] \\
 & + \frac{1}{8} [v_O(1+s)(1+t)(1+r) + v_P(1-s)(1+t)(1+r)]
 \end{aligned} \tag{2.42}$$

$$\begin{aligned}
w = & \frac{1}{8} [w_I(1-s)(1-t)(1-r) + w_J(1+s)(1-t)(1-r)] \\
& + \frac{1}{8} [w_K(1+s)(1+t)(1-r) + w_L(1-s)(1+t)(1-r)] \\
& + \frac{1}{8} [w_M(1-s)(1-t)(1+r) + w_N(1+s)(1-t)(1+r)] \\
& + \frac{1}{8} [w_O(1+s)(1+t)(1+r) + w_P(1-s)(1+t)(1+r)]
\end{aligned} \tag{2.43}$$

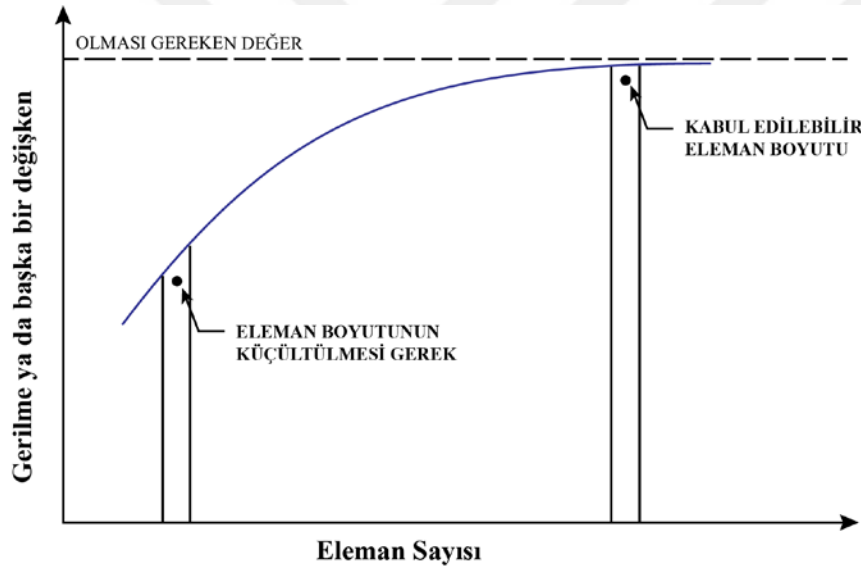
Ağ Yapısı

Analiz gerçekleştirilirken sonuçların gerçeğe yakın olması büyük oranla elemanların şekli, kalitesi, boyutu gibi özelliklere bağlıdır. Birinci kriter elemanların şeklidir. Kare şeklindeki elemanlar Jacobian matrisleri diagonal ve sabit olduğundan dolayı en iyi performansı vermektedirler. Şekil orantısızlaştığında sayısal integrasyon hassaslığını kaybetmekte ve Jacobian sıfıra yaklaşmaktadır. Bir diğer kalite kriteri ise en-boy oranıdır. Kare elemanın en-boy oranı bir'dir. Bu oran büyüdükçe elemanın performansı düşmektedir. Üçüncü kriter elemanın boyutudur. Eleman boyutu genellikle modelin boyutuna göre değişmektedir. Katı cisimler için ağ yapısı oluşturulurken kullanılan üç boyutlu elemanlar için de bu özellikler aranmaktadır. [60].

Önceki bölümlerde anlatılan elemanların dışında daha yüksek dereceli elemanlar da bulunmaktadır. Yukarıda bahsi geçen birinci derece elemanları, 1B iki nodlu bar; 2B üç nodlu üçgen ve 2B dört nodlu dörtgen; 3B dört nodlu tetrahedral ve 3B sekiz nodlu heksahedral oluşturmaktadır. İkinci derece elemanları, üç nodlu bar, altı nodlu üçgen, sekiz nodlu dörtgen, 10 nodlu tetrahedral ve 20 nodlu heksahedral oluşturmaktadır. Üçüncü derece elemanları ise, dört nodlu bar, dokuz nodlu üçgen, 12 nodlu dörtgen, 16 nodlu tetrahedral ve 32 nodlu heksahedral oluşturmaktadır. Yani eleman birinci derece ise her bir kenarı boyunca iki nod, ikinci derece ise üç nod, üçüncü derece ise dört nod bulunmaktadır. Genel olarak bir eleman ne kadar yüksek derecede ise o kadar hassas sonuç vermektedir. Ancak çözümü gerçekleştiren bilgisayardaki analiz süresinin, artan nod sayısı ve işlem hacmi nedeniyle bir hayli arttırmaktadır [60].

Uygun eleman boyutu seçimi, iyi sonuçlar elde etmek için oldukça önemlidir. Eğer ağ yapısı çok kaba olursa, sonlu elemanlar analizinin sonucunda büyük hatalar meydana gelmektedir. Eğer çok ince olursa, oldukça fazla serbestlik derecesi olacağından analiz süre bakımından

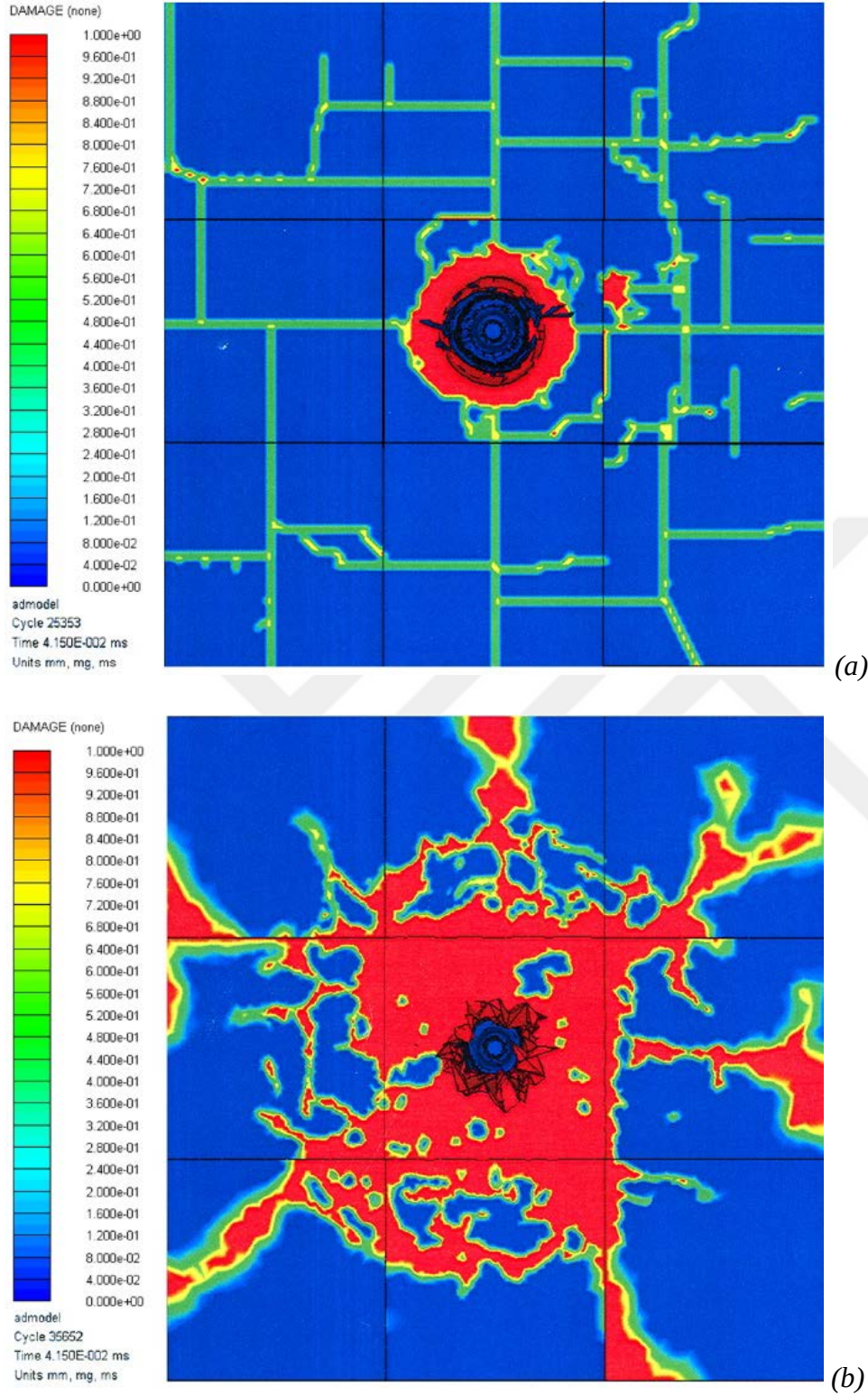
bir hayli zorlaşacaktır. Uygun eleman boyutunu belirlemenin iki metodu vardır. Bunlardan birincisi, hata analizidir. Hata analizinde orjinal değerlerle analizden elde edilen veriler karşılaştırılarak hata yüzdesi bulunur. Eleman boyutu kademeli olarak küçültülerek hata oranının istenilen değerin altına düşmesi sağlanır. İkinci metod ise, yakınsama çalışmasıdır. Meshten bağımsızlık analizi de denilen yakınsama çalışması, elde analitik sonuçlar olmadığı zaman oldukça güçlü bir yöntemdir. Yakınsama çalışması yapılırken, belirli büyüklükte elemanlar seçilerek analiz yapılır ve bir değer elde edilir. Daha sonra eleman boyutu küçültülür ve eleman sayısı artırılır. Şekil 2.14'te görüleceği gibi eğer değerler birbirine yakın değilse, işlem tekrarlanır. Eğer sonuçlar birbirine yakınsa kullanılan eleman boyutu ve sayısı yeterlidir [60]. Tez kapsamında yapılan meshten bağımsızlık analizi (yakınsama çalışması), Bölüm 3.3'te anlatılmıştır.



Şekil 2.14. Sonlu elemanlar analizi sonuçlarının yakınsaması

Tetrahedral ve Hekzahedral Eleman Karşılaştırılması

Tez kapsamında yapılmış öncü çalışmalardan birinde, aynı analiz şartları ve malzeme özelliklerinde yalnızca sonlu eleman şekli değiştirilerek aralarındaki fark incelenmiştir. Bölüm 2.7'de bahsedilen dört nodlu tetrahedral ve sekiz nodlu hekzahedral elemanlar, katı modellerde kullanılan en basit eleman tipleridir. Karşılaştırma yapılırken, analizde kullanılan geometri, başlangıç ve sınır şartları, malzeme modelleri ve eleman boyutları sabit tutulmuş; yalnızca eleman şekilleri tetrahedral ve hekzahedral olarak değiştirilmiştir. Elde edilen sonuç Şekil 2.15'te gösterilmiştir.



Şekil 2.15. Hekzahedral (a) ve tetrahedral (b) elemanlar ile analiz sonuçları

Sonuçlar değerlendirildiğinde; aynı boyda eleman kullanıldığında, aynı hacmin daha fazla tetrahedral eleman barındırmasından dolayı 0.04 ms'ye gelene kadar tetrahedral elemanlı analizde daha fazla döngü olmuş ve çok daha uzun sürmüştür. Analiz sonucunda kırmızı ile

görülen bölgeler hasarı 1.0'in üzerinde olan yani kırılmış ve kopmuş elemanları temsil etmektedir. Renk skalasında diğer renklerle görülen yerlerde ise derecesine göre plastik deformasyonun olduğu ancak kopma olmadığı anlaşılmaktadır. Buna göre tetrahedral elemanlı analizde çatlak ilerlemesinin ziyade bölgesel parçalanmalar ve kırılmalar meydana geldiği görülmektedir. Hekzahedral elemanlar ile yapılan analizde ise çatlakla daha uygun bir deformasyon olduğu bu sebeple kaba mesh ile yapılan analizlerde hekzahedral elemanların seçiminin daha doğru olacağı görülmektedir.

2.8. Zırh sistemlerinin sayısal modellenmesi

Ramadhan, Abu Talib, Mohd Rafie ve Zahari çalışmalarında, kompozit tabakalı plakaların yüksek hızda darbe davranışlarını bir azot gazı silahı yardımıyla deneysel olarak araştırmışlardır. Sandviç yapıları, Kevlar-29 fiber/epoxy reçinenin 6061-T6 Alüminyum plakalarla farklı katman yapılarında birleştirilmesiyle oluşturmuşlardır. Darbe deneylerini, hedefin tam perforasyonunu sağlamak için çeşitli hızlarda (180-400 m/s) ve 7,62 mm çapında silindirik çelik mermi kullanarak yapmışlardır. Deneysel çalışmada aynı koşulların yol açtığı balistik etkiyi, kompozitlerin absorbe ettikleri enerji seviyelerini ve hasar yapılarını incelemişlerdir. Deney şartlarını, geliştirilen numerik model yardımıyla Autodyn programını kullanarak simule etmişlerdir. Simulasyonlarda Johnson-Holmquist (JH2) malzeme modelini kullanmışlardır. Kompozit numunenin katmanlı plakalarının içindeki alüminyum levha pozisyonunun sırasını (ön, orta ve arka) incelediklerinde, elde edilen sonuçların hepsinde arka katmanda yer alan alüminyum plakasının, darbe yüküne direnecek optimum yapıda olduğunu görmüşlerdir. Sonuçlara dayanarak, oluşturdukları sandviç yapıların, yüksek hızda darbe yükleme koşullarında mükemmel enerji soğurma karakteristikleri sergilediklerini, maksimum hata oranı 3,64% olarak deneysel verilerle büyük bir uyum içerisinde olduklarını belirtmişlerdir [61].

Krishnan, Sockalingam, Bansal ve Rajan çalışmalarında, explicit finite element analizi kullanmış, modellerin nasıl oluşturulacağını açıklamış ve elde ettikleri sonuçların doğrulamasını yapmışlardır. Seramik malzemelerdeki çarpışma olgusunu modellemek için LS-DYNA programı içerisindeki Johnson-Holmquist malzeme modelini kullanmışlardır. Ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen malzemelere sünek destek oluşturmak için kullanıcı tanımlı malzeme modeli geliştirmişlerdir. Daha ince, hafif ve uygun maliyetli zırh paketi tasarlamak amacıyla yapılan optimizasyonun başarılı olduğunu belirtmişlerdir. Prototip

uzerinde yaptıkları laboratuvar testlerinin, sonlu elemanlar hasar öngörüler ve beklenen sonuçlar ile örtüştüğünü göstermişlerdir. Seramik malzemelerini JH2 malzeme modeli kullanılarak modellemiş ve nufuz etme derinliği testlerinin kalibrasyonlarında JH2 mukavemet ve hasar parametrelerini kullanmışlardır. Aynı prosedürü, merminin sonlu elemanlar modelinin oluşturulmasında da kullanılmışlardır. Aynı kişilerin daha önceki çalışmalarında oluşturdukları ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen malzeme modelini geliştirilerek tartışmış, seramik kompozit zırh için elde edilen numerik sonuçların deneysel verilerle örtüştüğünü vurgulamışlardır [62].

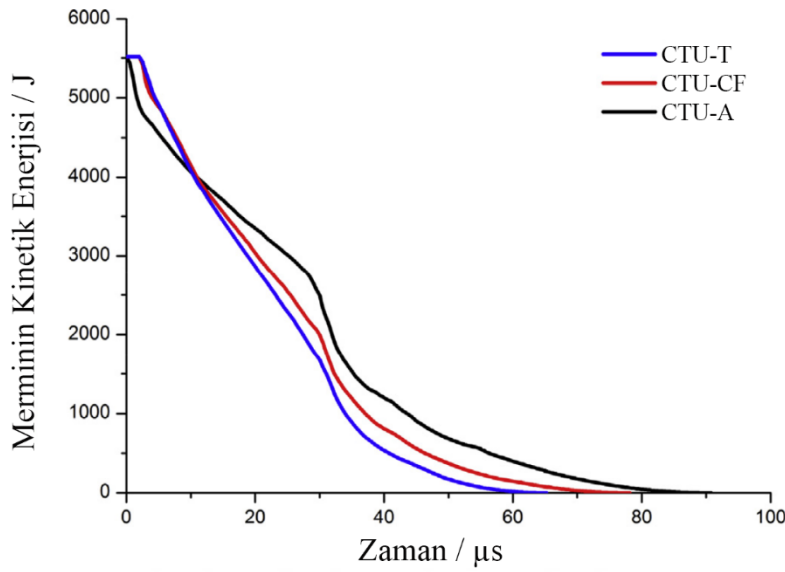
Hu, Zhang, Shen ve Cai, Ultra Yüksek Molekül Ağırlıklı Polietilen (UHMWPE) plaka ile bağlanmış mozaik Silisyum Karbür (SiC) seramiklerin balistik davranışına ilişkin deneysel çalışmayı, 7.62 mm x 51 mm Zırh Delici (AP) mermisine karşı sunmuşlardır. SiC seramiklerinin, mozaik SiC / UHMWPE kompozit zırhların balistik performansı üzerindeki üzerindeki etkisini sistematik olarak araştırmış; sert ve gevrek SiC ile yumuşak ve esnek UHMWPE'yi bir araya getiren kompozit zırhın kurşun geçirmezlik sürecini ayrıntılı olarak incelemişlerdir. Deneylerini, tek başına Ultra Yüksek Molekül Ağırlıklı Polietilen (UHMWPE) plaka, silindirik seramik önyüzlü zırh sistemi, hegzagonal seramik önyüzlü zırh sistemi ve kare seramik önyüzlü zırh sistemi kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Deneysel sonuçlarında mozaik seramiklerin geometrisinin balistik performansla doğrudan ilişkili olduğunu görmüşlerdir. UHMWPE plakadaki çöküntü miktarının 16.5 mm'den 43.2 mm'ye kadar değiştiğini göstermişlerdir. Zırh delici mermiyle doğrudan temas halinde olan mozaik seramiklerin tamamen kırıldığını; komşu seramik karolarda darbe yükü nedeniyle çatlaklar oluştuğunu ve merminin kinetik enerjisinin bir kısmının bu komşu seramik karoların çatlakları tarafından tüketildiğini; UHMWPE plakasındaki çöküntü miktarının fazla olmasının, merminin daha fazla kinetik enerjisinin tüketildiğini gösterdiğini; önünde seramik katman olmayan UHMWPE plakasıyla temas eden merminin, fiber takviyeli kompozitin düşük sertliğinden dolayı çok az dirence maruz kaldığını ve kolayca nüfuz ettiğini belirtmişlerdir. Sonuç olarak, merminin penetrasyon işlemi sırasında SiC seramik ön katmanı tarafından aşındırılmış ve yavaşlatılmış olduğunu; kurşun geçirmezlik özelliğinin artan mozaik seramik boyutuyla arttığını; esnek UHMWPE destek plakasının, mermi kinetik enerjisini tüketmek için dört kenarda konveks deformasyon, delaminasyon ve lokal kasılmalara uğradığını; sert ön katmanın ve esnek destek plakası olarak incelenen kompozit yapı kombinasyonunun, hafif zırhların tasarımı için büyük potansiyele sahip olduğunu vurgulamışlardır [63].

Ong, Boey, Hixson ve Sinibaldi eksplisit sayısal teknikleri yardımıyla, merminin yenilgisi esnasında her katmanın oynadığı rolü optimize ederek kompozit personel zırhını tasarlamak için bir model geliştirmişlerdir. Mermiyi deforme etmek ve kırmak amacıyla çok sert bir 1. tabaka; şok dalgasının enine yönde hızlı yayılmasına izin verirken, kalınlık boyunca yavaşlatılması amacıyla ortotropik bir 2. tabaka; basınç-hacim işi sırasında şok dalgasını absorbe etmek amacıyla gözenekli bir 3. tabaka; ve gözenekli katmanı sınırlandırmak adına 4. tabaka tasarlamışlardır. Bu koruma kavramına göre kompozit tabakaları alümina seramik (Al_2O_3), Dyneema®HB25, gözenekli poliüretan (PU) köpük ve AISI 4140 çelik levhadan oluşturmuşlardır. Dyneema HB25'e benzeyen varsayımsal bir ortotropik malzeme modelini, temel malzeme ilişkilerine ve sınırlı mevcut literatür bilgilerine dayanarak türetmiş, diğer malzemeler için malzeme modellerini mevcut kütüphaneden kullanmışlardır. Ayrıca, bu kompozit zırhın sayısal simülasyonunu doğrulamak amacıyla bir deney yapmışlardır. Her katmanın kırılma, enerji soğurması, enerji dağılımı gibi davranış mekanizmalarını gözlemlmeleri sonucunda, katmanlı zırh diziliminin esasen doğru olduğu ve bir sonraki aşamanın kalınlık ve performansın optimize edilmesi olduğu sonucuna varmışlardır. Deneysel çalışmaları yapılmadan önce gerçekleştirilecek simülasyonlarda, şok dalgalarının çeşitli malzeme sınıfları boyunca nasıl hareket ettiklerini gerçeğe yakın bir performansla görülebileceğini göstermişlerdir [64].

Liu, Chen, Cheng, Wang, Amankwa ve Xu çalışmalarında, esas olarak kompozit arka plakaların rasyonel tasarımını keşfetmek ve yüksek performanslı zırh sistemi oluşturmak için seramik silindir tabakasıyla birleştirmişlerdir. Sandviç yapısında üçüncü katman olarak sırasıyla Ti6Al4V tabaka, karbon fiber tabaka ve alüminyum alaşımı tabaka seçmişlerdir. Bu katmanları, birinci katman olarak Ti6Al4V ve orta katman olarak UHMWPE ile birleştirmişler ve zırh sistemlerini alümina seramik malzemelerle inşa etmişlerdir. Oluşturulan zırh sisteminin 818 m/s hıza sahip 12.7 mm zırh delici mermisine karşı nüfuz etme sürecini incelemiş ve kompozit arka plakalardaki her tabakanın balistik mekanizmasını, deneysel ve sayısal olarak ayrıntılı olarak tartışmışlardır. Şekil 2.11'de görülen merminin üç farklı kombinasyon için kinetik enerji değişimini göstermişlerdir [65].

Grafikten görüldüğü gibi, birinci durumda mermi seramik silindir tabakalarına girdiğinde, kinetik enerjisinin, 5520 J'den 1866 J'ye düştüğünü; yani seramik tabaka tarafından emilen enerjinin, toplam enerjinin %66'sı olduğunu; bu emilimin en az olduğu üçüncü durumda bile toplam enerjinin %54'ünün emildiğini belirtmişlerdir. Ardından, bileşik arka plakalara nüfuz

eden süreçte, karbon fiber tabaka ve alüminyum alaşım tabakası ile karşılaştırıldığında Ti6Al4V'nin birinci tabakaya güçlü bir destekleyici rol sağladığını ve eş zamanlı olarak UHMWPE'nin orta katmanından enerji denge işlevini arttırdığını göstermişlerdir. Gözlemlenen sonuçlara göre, seramik silindirlerden oluşan zırh sisteminin ve Ti6Al4V / UHMWPE / Ti6Al4V kompozisyonundaki kompozit plakalarının, mükemmel bir kurşun geçirmez özellik sergilediğini vurgulamışlardır [65].



Şekil 2.16. Merminin kinetik enerjisinin zamana göre değişimi [65]

Yukarıda bahsi geçen çalışmalara ek olarak farklı malzeme ve inceleme konularında çalışmalar mevcuttur. Teknolojik gelişmelerle birlikte günümüzde büyük bir hızla büyüyen askeri sanayii kapsamında, değişen tehditlere karşı kullanılabilecek zırh sistemleri hakkında yapılan çalışmalar da gün geçtikçe önem kazanmaktadır.

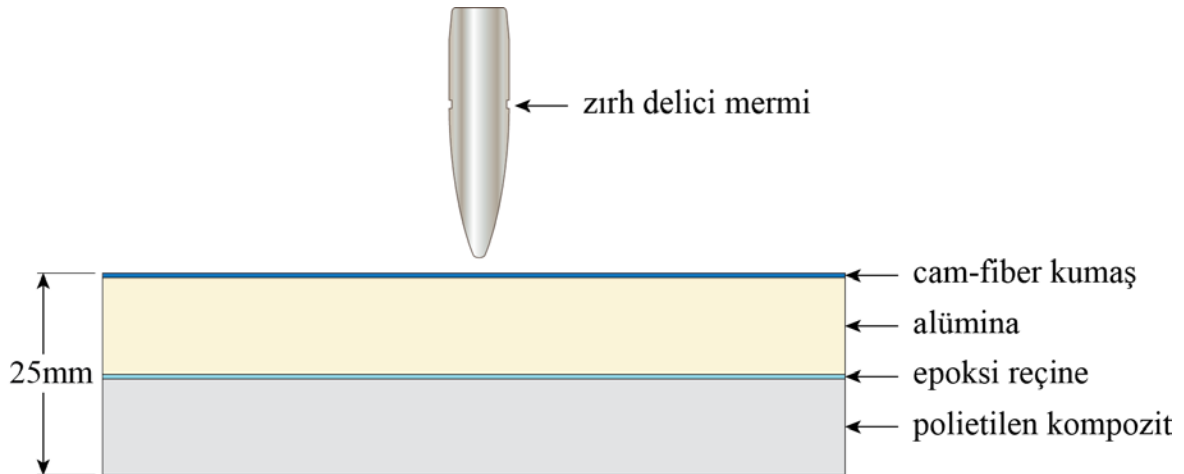


3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu tez kapsamında, seramik önyüzlü kompozit bir zırh sisteminin balistik darbe davranışları incelenmiş ve sayısal modellemesi yapılmıştır. Seramik ön yüz olarak Alümina (Al_2O_3) tercih edilmiş, arka destek katmanında ise ultra yüksek molekül ağırlıklı polietilen kompozit malzeme kullanılmıştır. Testlerde kullanılan mermi 7,62mm x51 (AP) zırh delici mermidir. Testler Nurol Teknoloji A.Ş. bünyesindeki laboratuvarlarda yapılmış, sayısal modelleme ise Gazi Üniversitesi bünyesinde lisanslı olarak bulunan ANSYS programı yardımıyla gerçekleştirilmiştir.

3.1. Zırh Sisteminde Kullanılan Materyal

Seramik önyüzlü zırh sisteminde, basma dayanımı, korozyon direnci ve sertliğinin yüksek olması nedeniyle alümina seramik kullanılarak üzerine isabet eden yüksek kinetik enerjiye sahip merminin ucunun deforme olması, hatta parçalanması hedeflenmiştir. Arka yüzeyde ise, belirli bir hıza kadar yavaşlayan ve körelen merminin artık kinetik enerjisinin sönmölenmek ve oluşan parçacıkların dağılmasını engellemek amacıyla ultra yüksek molekül ağırlıklı polietilen kompozit kullanılmıştır. Şekil 3.1’de şematik olarak görölen zırh sisteminde parçalar birbirlerine epoksi reçine yardımıyla yapıştırılmıştır. Deneylerde kullanılan zırh sistemlerinin bazılarında, ön yüzeyde kırılan seramik parçaları bir arada tutmak ve diğer zırh sistemleri ile aralarındaki farkı görmek amacıyla tek kat koruyucu cam-fiber kumaş yerleştirilmiştir.

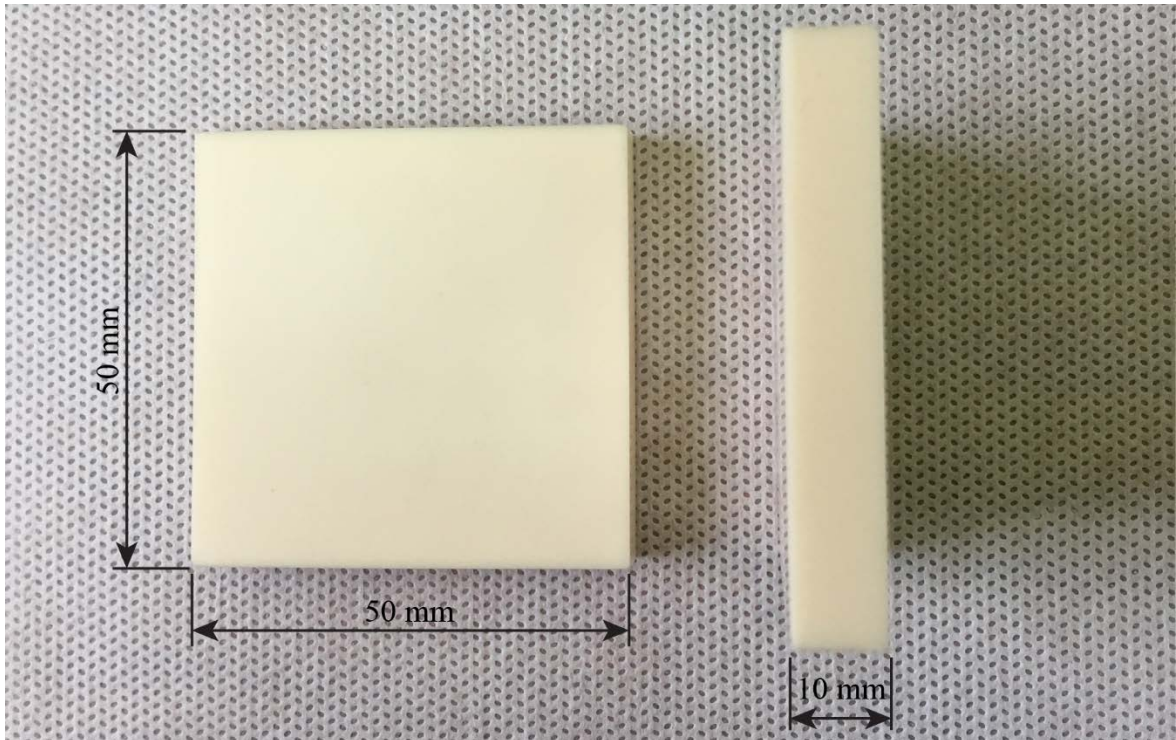


Şekil 3.1. Deneylerde kullanılan seramik kompozit zırh modeli

Seramik

Seramik önyüzlü kompozit zırh sisteminde kullanılan Alümina, mühendislik seramikleri arasında en uygun maliyetli ve en yaygın olarak kullanılan malzemelerden biridir. Fiyatına oranla koruma performansının iyi olması nedeniyle bir çok alanda tercih edilmektedir. Alümina seramikler, yüksek mukavemet ve sertliğe sahip, ısı iletkenliği iyi, yüksek sıcaklıklara, asit ve alkaliye karşı dirençli, mükemmel dielektrik özelliklere sahip, çok geniş boyut ve şekil kapasitesine sahip ürünlerdir. Yüksek saflıktaki alümina seramikler, yüzde 99,5'in üzerinde alüminyum oksit (Al_2O_3) içeriğine sahip olan seramiklerdir. Alüminyum oksit seramiklerin sinterleme sıcaklıkları 1650-1990°C arasında değişmektedir.

Deneyleerde kullanılan alümina (Al_2O_3) seramikler Çin'den temin edilmiştir. Seramikler yüzde 99,5'in üzerinde saflıkta alüminyum oksitten yani "alümina"dan (Al_2O_3) oluşmaktadır. Her bir seramik karo, $10^{\pm 0,05}$ mm kalınlığa ve $50 \times 50^{\pm 0,05}$ mm kare yüzey alanına sahiptir. Hacmi yaklaşık 25 cm^3 olan seramik karoların ağırlıkları 95-97 gram, özkütleleri $3,8-3,9 \text{ g/cm}^3$ arasındadır. Çin'in Xiamen Innovacera Advanced Materials Limited Şirketi'nden getirtilen ve Resim 3.1'de görülen seramiklere ait laboratuvar analizleri ve sertifika Ek-1 ve Ek-2'de yer almaktadır.

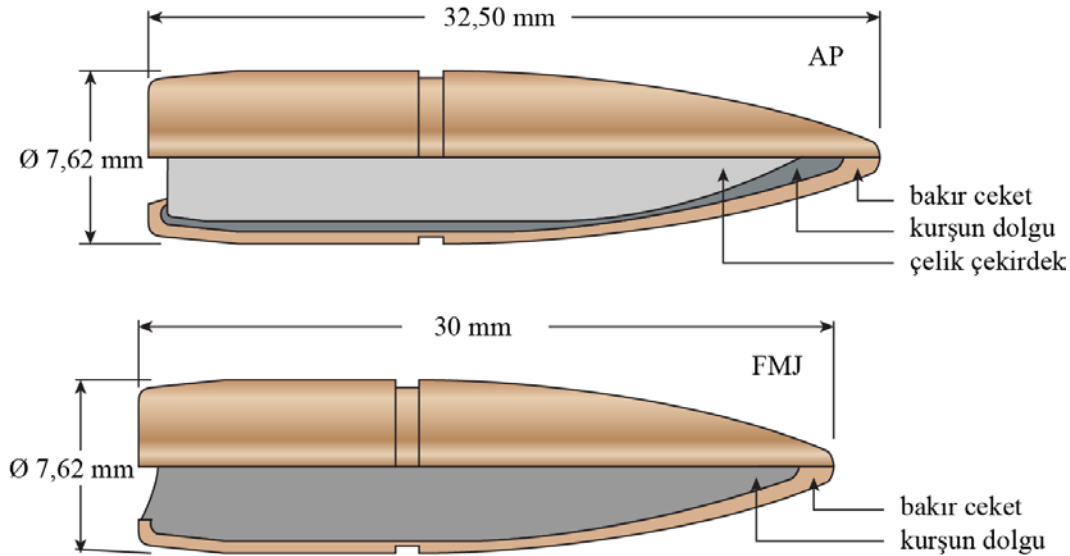


Resim 3.1. Deneyleerde kullanılan alümina seramik karolar

Mermi

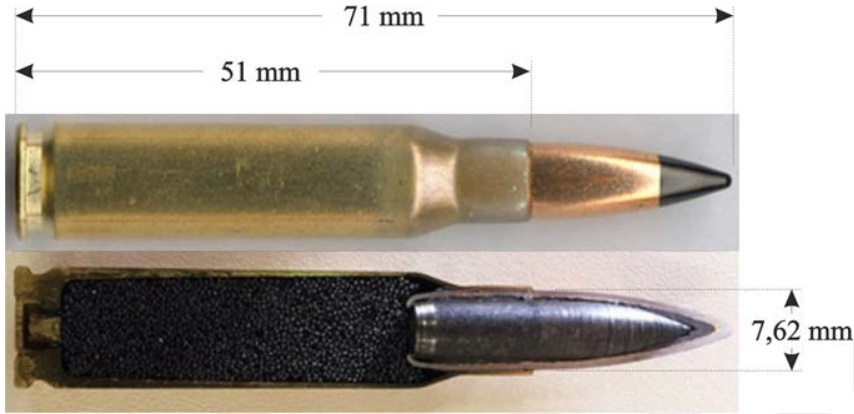
Seramik önyüzlü zırh sistemlerinin balistik koruma seviyeleri belirlenirken Amerikan NIJ standartlarında seviye III, NATO Standartları STANAG 4569'a göre ise yine seviye 3 esas alınmaktadır. Her iki standartta da 7,62mm x51 (AP) zırh delici mermi kullanılmaktadır. Deneylerde kullanılan mermiler de, MIL-C-60617 standartlarına uygun olarak MKE Gazi Fişek Fabrikası'nda üretilmiş zırh delici mermilerdir. Mermilere ait teknik resim Ek-3'te verilmiştir.

Küçük çaplardaki ateşli silahlarda kullanılan, mermi çekirdeği, mermi kovanı ve sevk barutundan oluşan yapıya fişek adı verilmektedir. Fişegi oluşturan bu parçalar bir birbirine sıkıca bağlı durumdadır. Mermi kovasının arka ucunda, tetik çekildiğinde barutun ateşlenmesini sağlayan ve kapsül adı verilen bir ateşleyici bulunmaktadır. Ateşleme, iğne çarpması ya da elektrik tahriki yoluyla yapılmakta ve kovandaki barut tutuşturulmaktadır. Barutun yanmasıyla ortaya çıkan sıcak gaz basıncı ise, mermi çekirdeğini ileriye doğru itmekte ve çekirdek namlu ağzından büyük bir hızla çıkarak hedefe doğru ilerlemektedir. Zırh delici özelliği olmayan mermilerin içi kurşun dolguyla kaplı olduğundan dolayı, hafif silahların mermileri kurşun olarak da adlandırılmaktadır. Zırh delici mermilerde ise kurşun dolgunun içerisinde bir de çelik ya da tungsten çekirdek bulunmaktadır. Fişeklerde mermi ile mermi kovanı bir bütün olarak durmakta ve yalnızca sevk barutu ateşlendiğinde birbirinden ayrılmaktadır. Zırh delici ve kurşun dolgulu mermi kesitleri şematik olarak Şekil 3.2'de gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Zırh delici (AP) ve bakır ceket kaplı kurşun (FMJ) mermi

Resim 3.2’de gösterilen fişeklerin ismini belirleyen özelliklerden olan, çekirdek çapı 7,62 mm, kovan uzunluğu ise 51 mm’dir. Merminin zırh delici özelliği, içerisinde bulunan çelik çekirdekten kaynaklanmaktadır. Zırh delici merminin, kovanla birlikte toplam uzunluğu yaklaşık 71 mm, çekirdek ağırlığı yaklaşık 10 gram, kovan içerisindeki barut miktarı yaklaşık 2,80 gramdır. Merminin namlu ağzından çıkış hızı ise yaklaşık 835 m/s’dir.



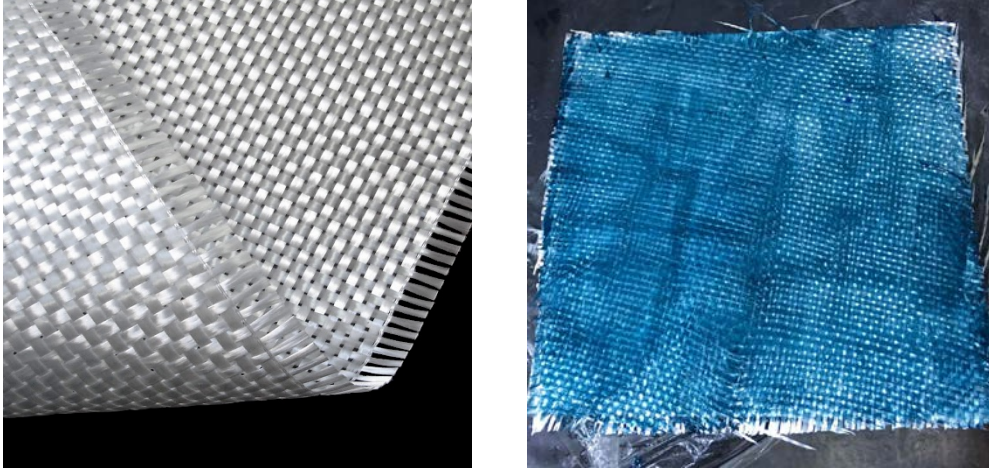
Resim 3.2. 7,62mm x51 (AP) fişek ve kesiti

Diğer Materyaller

Deneyler sırasında seramik önyüzlü zırh sistemi oluşturulurken, seramiklerin arka kısmında yer alan destek katmanı olarak 10 mm kalınlığında ultra yüksek molekül ağırlıklı polietilen (UHMWPE) kompozit yerleştirilmiştir (Şekil 3.2). Ayrıca bazı numunelerin ön yüzeyine, darbe sonrası kırılan seramik parçalarının dağılmaması için Şekil 3.4’te görülen bir kat cam-fiber kumaş yerleştirilmiştir.



Resim 3.3. Ultra yüksek molekül ağırlıklı polietilen kompozit



Resim 3.4. Cam-fiber dokuma kumaş

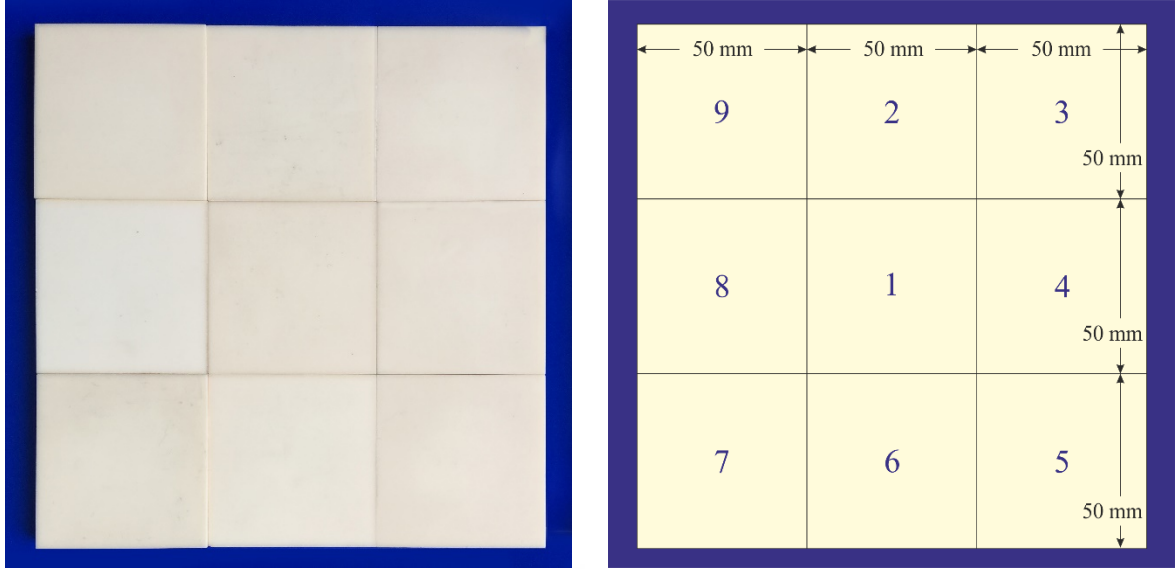
Polietilen kompozit ve cam-fiber kumaş Nurol Teknoloji Sanayi ve Madencilik A.Ş. bünyesinde halihazırda askeri ürünlerde kullanılan ürünler olduğundan dolayı teknik verileri gizli bilgi olarak paylaşılamamaktadır. Deney numunelerinde ayrıca, seramikleri, destek kompoziti ve kumaşı bir arada tutmak amacıyla epoksi reçine kullanılmıştır.

3.2. Test Yöntemi

Tez kapsamında gerçekleştirilen balistik testler, Nurol Teknoloji Sanayi ve Madencilik A.Ş. bünyesinde yer alan, yerleşkesi Yenimahalle/Ankara'da bulunan balistik test laboratuvarında yapılmıştır.

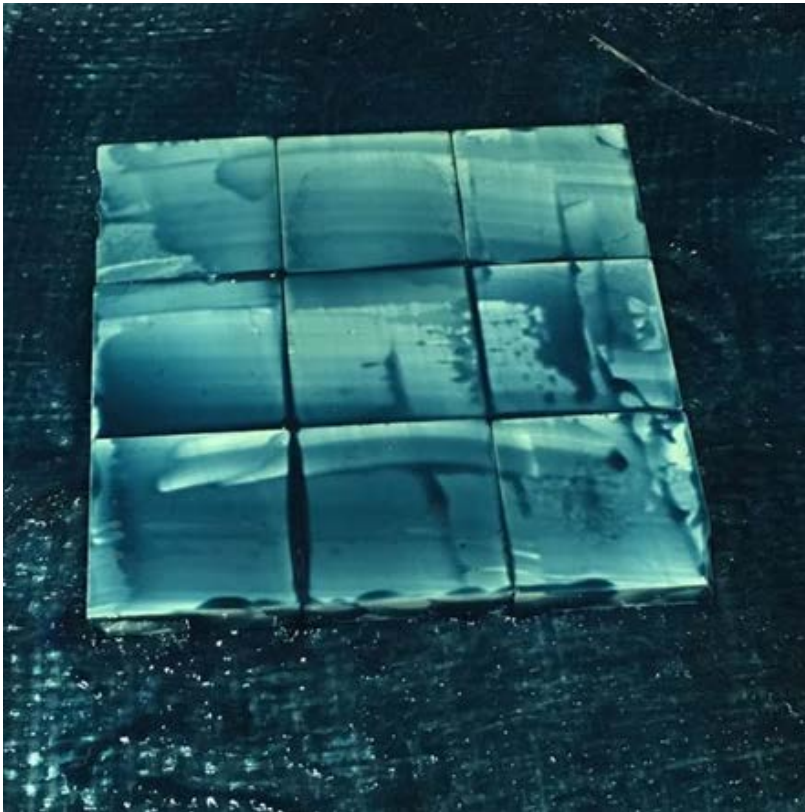
Nurol Teknoloji Sanayi ve Madencilik A.Ş. bünyesinde götürülen alümina seramik karolar, Resim 3.5'te görüldüğü gibi üçe üç kare şeklinde yanyana ve altalta gelecek şekilde düzenlenmiştir. Her deney numunesi için 50x50 mm boyutlarında 10 mm kalınlığında 9 adet Alümina seramik kullanılmıştır.

Daha sonra Resim 3.6'da görüldüğü gibi epoksi reçineye bulanarak dizilmiştir. Seramik karolar, arka yüzeylerine gelecek şekilde yerleştirilen ve destek tabakası olarak kullanılan ultra yüksek molekül ağırlıklı polietilen kompozite yine epoksi reçine yardımıyla birleştirilmiştir. Epoksi reçine yardımıyla birleştirilen Alümina seramik karoları ve polietilen kompozit destek tabakası, fırınlanma sırasında bir arada durmaları ve birbirlerine daha iyi yapışmalarını sağlamak amacıyla vakumlanmaktadırlar.

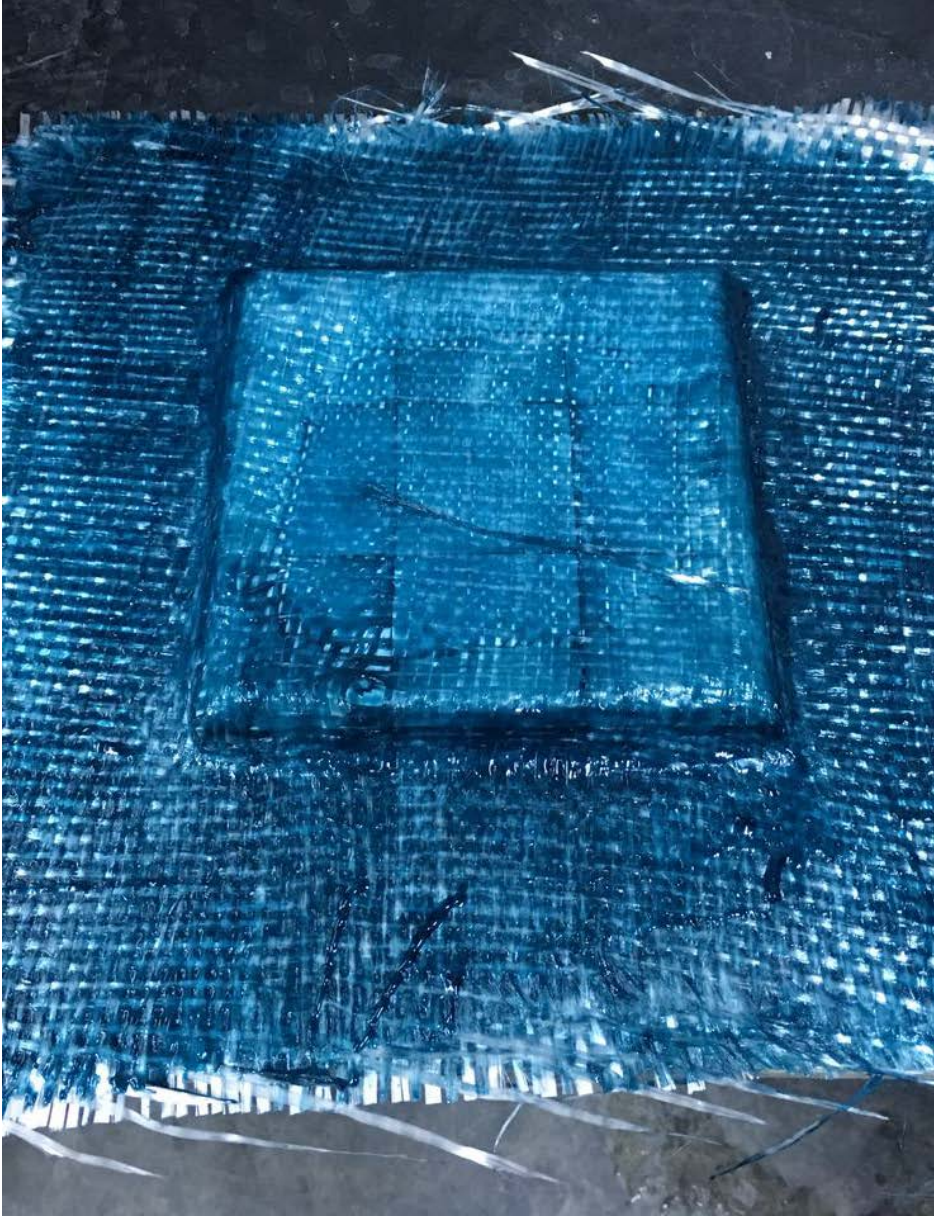


Resim 3.5. Zırh sisteminde kullanılan Alumina seramiklerin dizilişi

Oluşturulan zırh sistemlerinin bazılarının en üst yüzeyine, Resim 3.7’de görüldüğü gibi çarpışma sırasında seramiklerin dağılmasını önlemek amacıyla, epoksi reçine emdirilmiş bir kat cam-fiber dokuma kumaş yerleştirilmiştir. Hazırlanan bu zırh sistemleri son olarak vakumlanmış, fırınlanmış ve ardından Resim 3.8’de görüldüğü gibi kurumaya bırakılmıştır.



Resim 3.6. Üzerinde cam-fiber kumaş bulunmayan deney numunesi

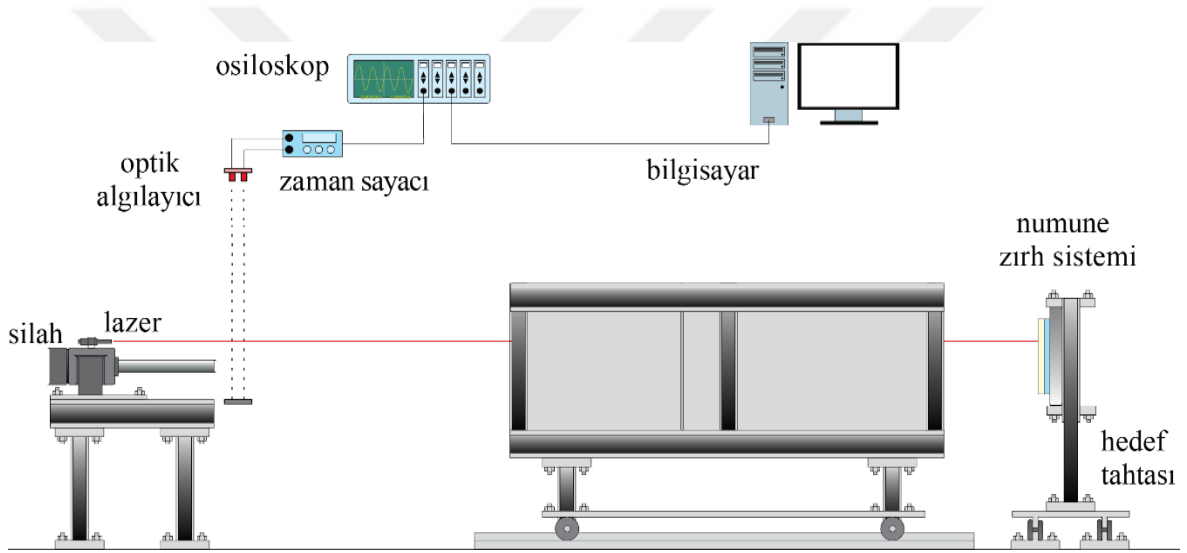


Resim 3.7. Üzerinde bir kat cam-fiber kumaş bulunan deney numunesi



Resim 3.8. Fırınlanmış ve kurumuş deney numuneleri

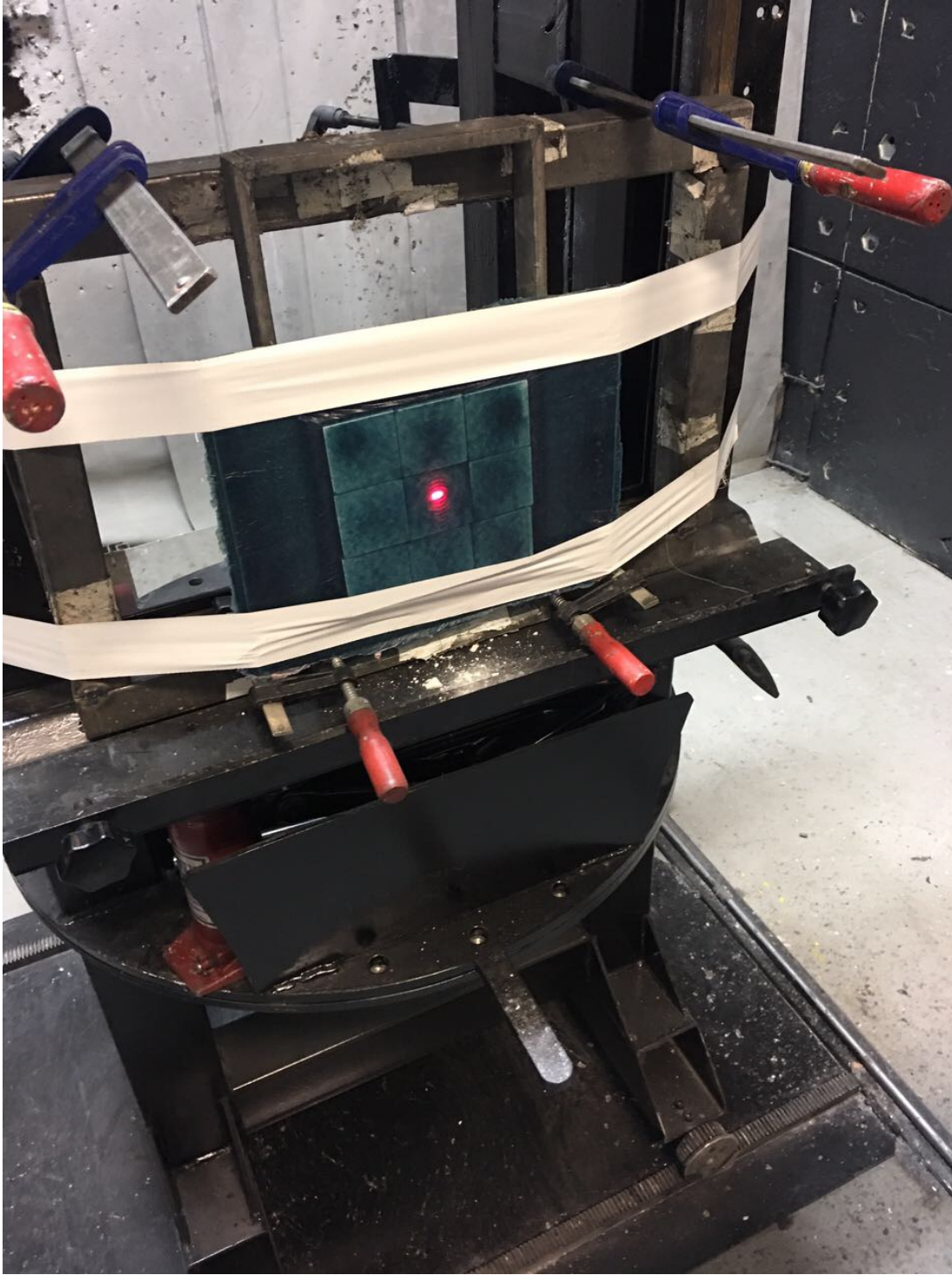
Şematik olarak Şekil 3.3'te gösterilen test düzeneğinde mermi, namlusu değiştirilebilir sabit bir silahtan ateşlenmektedir. Nişanlama, hedef üzerine düşürülen lazer ışığı yardımıyla yapılmaktadır. Hedef standartlara uygun uzaklıkta ve raylı sistem üzerinde hareket edebilir şekilde çelik konstrüksiyondan imal edilmiş hedef tahtasına yerleştirilmektedir. Hedef yerleştirildikten sonra yine raylı sistem üzerinde bulunan koruma amaçlı imal edilmiş çelik konstrüksiyon tünel, hedefin etrafını kapatacak şekilde hareket ettirilmektedir. Mermi hedefe ulaştıktan sonra, parçalanma sonucu yüksek hızla etrafa saçılan parçaların çevreye zarar vermesini engellemek amacıyla bu tünel kullanılmaktadır. Mermi, namlu ucundan çıktıktan sonra optik algılayıcılar yardımıyla hızı ölçülmekte ve veriler bir bilgisayar yardımıyla toplanmaktadır.



Şekil 3.3. Deneylerde kullanılan balistik test düzeneği

Hazırlanan alümina seramik önyüzlü, ultra yüksek molekül ağırlıklı polietilen kompozit destek tabakalı zırh sistemleri bu test düzeneğine yerleştirildikten sonra, Makine ve Kimya Endüstrisi Kurumu üretimi olan 7,62 mm x51 zırh delici mermiler kullanılarak atışlar gerçekleştirilmiştir.

Şekil 3.3'te yer alan test düzeneğinin tanıtımında yazıldığı gibi mermi hızları optik sensörler yardımıyla kayıt altına alınmıştır. Yapılan dört farklı deneyde silah namlusundan çıkan mermi hızlarının 835 m/s ile 840 m/s arasında değiştiği görülmüştür. Resim 3.9'da test düzeneğine ait hedef tahtası üzerine yerleştirilen numunelerden biri ve üzerindeki lazer izdüşümünün resmi görülmektedir.



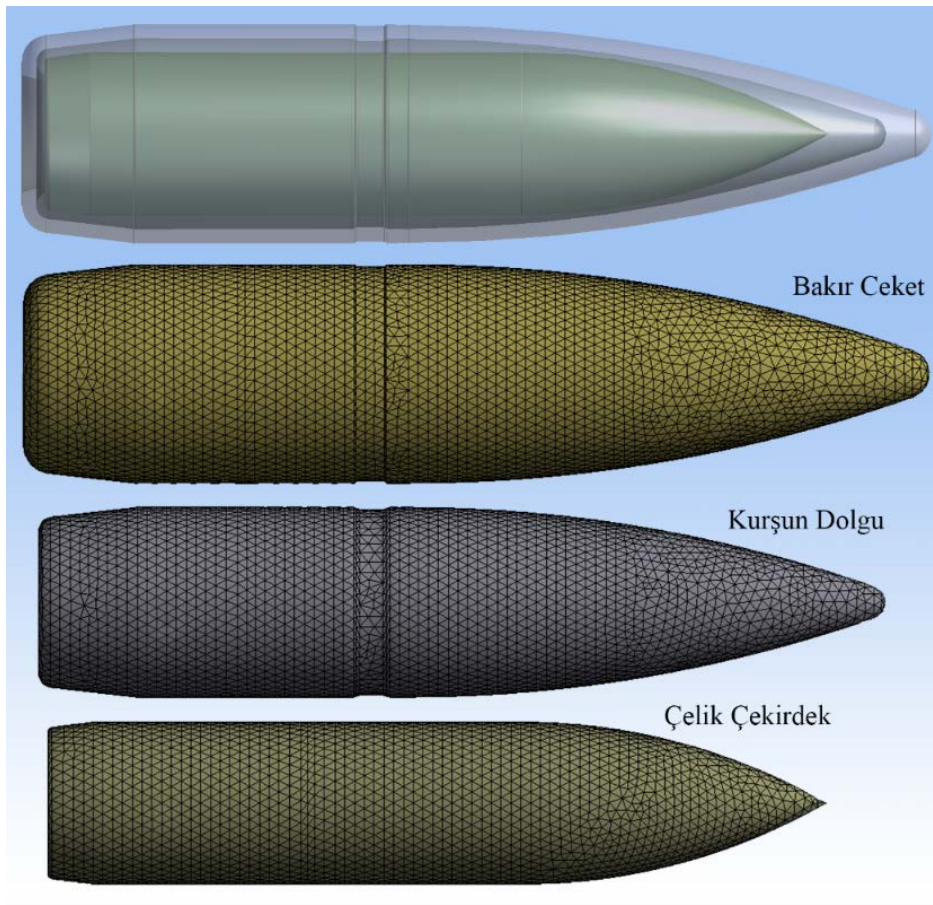
Resim 3.9. Test düzeneğine bağlanmış zırh numunesi

3.3. Sayısal Modelleme

Yapılan tez çalışmaları süresince bir çok parametre değiştirilerek, farklı analizler gerçekleştirilmiş, bu analizlerde çeşitli sonuçlara ulaşılmıştır. Edinilen bu deneyimler ve

bilgiler, gerçekleştirilen testlerin modellenmesi yapılırken büyük kolaylık sağlamıştır. Deneysel çalışmalar gerçekleştirildikten sonra, oluşturulan sistemin yeniden modellenmesi yapılmış, analizler bu şekilde yeniden türetilmiştir.

Ek-2’de bulunan teknik resimlerine göre Şekil 3.4’te görüldüğü gibi katı modeli gerçekleştirilen merminin ortasında 28 mm uzunluğunda 5,82 mm çapında bir çelik çekirdek bulunmaktadır. En dışında 32,5 mm uzunluğunda, 7,836 mm çapında bir bakır ceket bulunmaktadır. Bu çekirdek ve ceket arasında ise kurşun dolgu bulunmaktadır.



Şekil 3.4. Mermi katı modeli

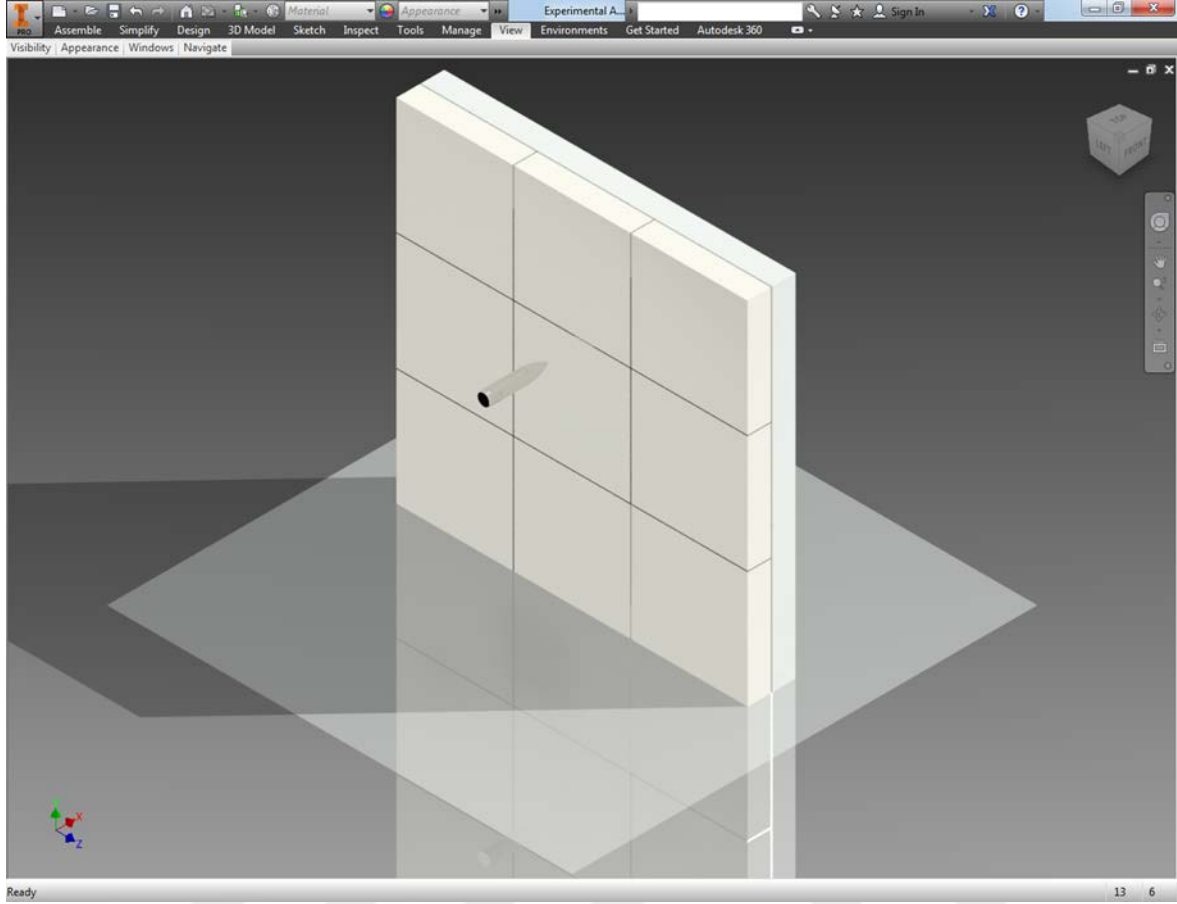
Gerçek ölçülere göre katı modellenen merminin çelik çekirdeğinin hacmi $609,19 \text{ mm}^3$, yüzey alanı $472,10 \text{ mm}^2$; kurşun dolgusunun hacmi $204,62 \text{ mm}^3$, yüzey alanı $1012,40 \text{ mm}^2$; bakır ceketini hacmi $342,91 \text{ mm}^3$, yüzey alanı $1258,50 \text{ mm}^2$ olarak hesaplanmaktadır. Bakır ceketin et kalınlığı ise çoğu yerde $0,520 \text{ mm}$ 'dir. Bakır ceket ve kurşun dolgunun şekil ve boyutlarından dolayı oluşturulan sonlu elemanlar oldukça küçülmekte ve sayısı bir hayli fazla olmaktadır.

Tez süresince yapılan analizler sonucunda; mermi modelindeki bakır çeket ve kurşun dolgu malzemelerinin, çok sünek olduklarından dolayı seramik yüzeye çarptıkları anda sıyrıldıkları görülmüştür. Analiz esnasında bünyelerinde çok fazla sonlu eleman bulunduran bu bakır çeket ve kurşun dolgu zaman adımlarını kontrol etmekte ve çok küçük zaman adımları ile analiz hızını bir hayli yavaşlatmaktadırlar. Bu bakır çeket ve kurşun dolgu katmanları dahil edilerek yapılan modelleme ve dahil edilmeden yapılan modelleme analiz sonuçlarının, bu tez kapsamında yapılan inceleme için önemli bir değişikliğe neden olmadığı görülmüştür. Bu bağlamda, sonradan türetilen analizlerin hızlanması ve çeşitlendirilmesi için, analizler yalnızca zırh delici özelliği veren çelik çekirdek modellenerek yapılmıştır. Deneyleri yapılan seramik önyüzlü polimer kompozit destek tabakalı zırh sistemlerinin ve merminin katı modellemeleri, Autodesk Inventor programı kullanılarak Resim 3.10'da görüldüğü gibi yeniden çizilerek yapılmıştır.

Seramik Kompozit Zırh Sistemlerinin Darbe ve Balistik Özelliklerinin Sayısal Modellenmesi başlıklı bu tez süresince yapılan çalışmalarda, araya bir yapıştırıcı katman belirlenmeden birbirleriyle bitişik modellenen seramik karolar; farklı sınır şartları tanımlanarak denenmesine rağmen bir bütün gibi davranış göstermiştir ve oluşan çatlakların seramikten seramiğe hiç bir sapma olmadan devam ettiği gözlemlenmiştir. Bu yüzden, yapılan son modellemede analiz hızını bir hayli etkilemesine rağmen seramikler arasına ve seramiklerin destek tabakasıyla olan yüzeyine, deney numunelerinde olduğu gibi 0,5 mm kalınlığında epoksi reçine modellenmiştir.

Ön katmanda yer alan Seramikler gerçeğe uygun olarak, 50 milimetre kenarlı kare yüzeye ve 10 mm kalınlığa sahip olarak modellenmiştir. Aralarına ve arka yüzeylerine yarım milimetre kalınlıkta epoksi tabakası yerleştirildikten sonra; arka tabaka olan poli-etilen kompozit, 10 milimetre kalınlıkta ve tüm arka yüzeyi kaplayacak şekilde modellenmiştir.

Merminin çekirdeğinin hareket doğrultusu pozitif x eksenini olarak modellenmiştir. Mermi çekirdeği deneylerde olduğu gibi, y ekseninde ve z ekseninde 10 milimetre olmak koşuluyla merkezden kaçık bir şekilde, ortadaki seramiğin köşesine doğru çarpacak şekilde modellenmiştir. Ayrıca mermi çekirdeğinin katettiği yol süresince analiz devam ettiğinden, boşa geçen sürenin azaltılması adına mermi çekirdeği, çarpışma yüzeyinin 0,1 milimetre önüne gelecek şekilde yerleştirilmiştir.



Resim 3.10. Deneysel çalışması yapılan zırh sisteminin katı modellemesi

Katı modeli hazırlanan geometri ANSYS Workbench arayüzünde içe aktarıldıktan sonra analiz ayarlamaları yapılmıştır. İlk olarak malzeme kütüphanesinden çekilen malzeme modellerinin gerekli güncellemeleri yapılmıştır. Modellemeler esnasında dört farklı malzeme kullanılmıştır. Zırh delici mermi çekirdeği için çelik, seramikler için yüksek saflıkta alüminyum oksit ($99,7\% \text{Al}_2\text{O}_3$), yapıştırıcı katmanlar için epoksi reçine, destek katmanı için poli-etilen malzemeler seçilmiştir. Bu malzeme modellerinin parametreleri Çizelge 3.1’den Çizelge 3.4’e kadar görülmektedir.

ANSYS programı altında modelleme yapılırken başlangıç şartı olarak yalnızca mermi hızı alınmıştır. Mermi hızı pozitif x eksenı doğrultusunda, deneysel çalışmalarda ve standartlarda olduğu gibi 835 m/s olarak tanımlanmıştır. Tez çalışması süresince yapılan analizlerden anlaşıldığına göre merminin hızı yaklaşık 0,15 milisaniye gibi bir zaman aralığında sıfırlanmaktadır.

Çizelge 3.1. AL2O3-99.7 (Alumina malzeme modeli)

Özellik	Değer	Birim
Yoğunluk, ρ	3850	kg/m ³
Bulk Modülü, K_I	200	GPa
Kesme Modülü, G	135	GPa
Hugoniot Elastic Limit, HEL	5,900	GPa
Hasarsızlık Dayanım Sabiti, A	0,989	
Hasarsızlık Dayanım Üsteli, N	0,3755	
Gerinim Hızı Sabiti, C	0	
Kırılma Dayanımı Sabiti, B	0,77	
Kırılma Dayanımı Üsteli, M	1	°C
Mak. Kırılma Dayanımı Oranı, $SFMAX$	0,5	
Hasar Sabiti, D_I	0,01	
Hasar Üsteli, D_2	1	
Hacim Artış Sabiti, β	1	
Hidrodinamik Çekme Limiti, T	-29	MPa
Parametre, A_I	200	GPa
Parametre, T_I	200	GPa

Çizelge 3.2. STEEL 4340 (Çelik malzeme modeli)

Özellik	Değer	Birim
Yoğunluk	7830	kg/m ³
Özgül Isı	477	J/kg°C
Esneklik Modülü	1,59 E+11	Pa
Kesme Modülü	8,18 E+10	Pa
Akma Dayanımı	7,92 E+08	Pa
Pekleştirme Sabiti	5,10 E+08	Pa
Pekleştirme Üsteli	0,26	
Gerinim Hızı Sabiti	0,014	
Isıl Yumuşama Katsayısı	1,03	
Ergime Sıcaklığı	1519,9	°C
Referans Gerinim Hızı	1	/s

Çizelge 3.3. EPOXY RES. (Epoksi reçine malzeme modeli)

Özellik	Değer	Birim
Yoğunluk	1160	kg/m ³
Kesme Modülü	1,40 E+09	Pa
Gruneisen Sabiti	1,13	
Parametre C1	2730	m/s
Parametre S1	1,493	

Çizelge 3.4. POLYETHYL. (Polietilen malzeme modeli)

Özellik	Değer	Birim
Yoğunluk	950	kg/m ³
Kesme Modülü	4,00 E+08	Pa
Gruneisen Sabiti	1,64	
Parametre C1	2901	m/s
Parametre S1	1,481	

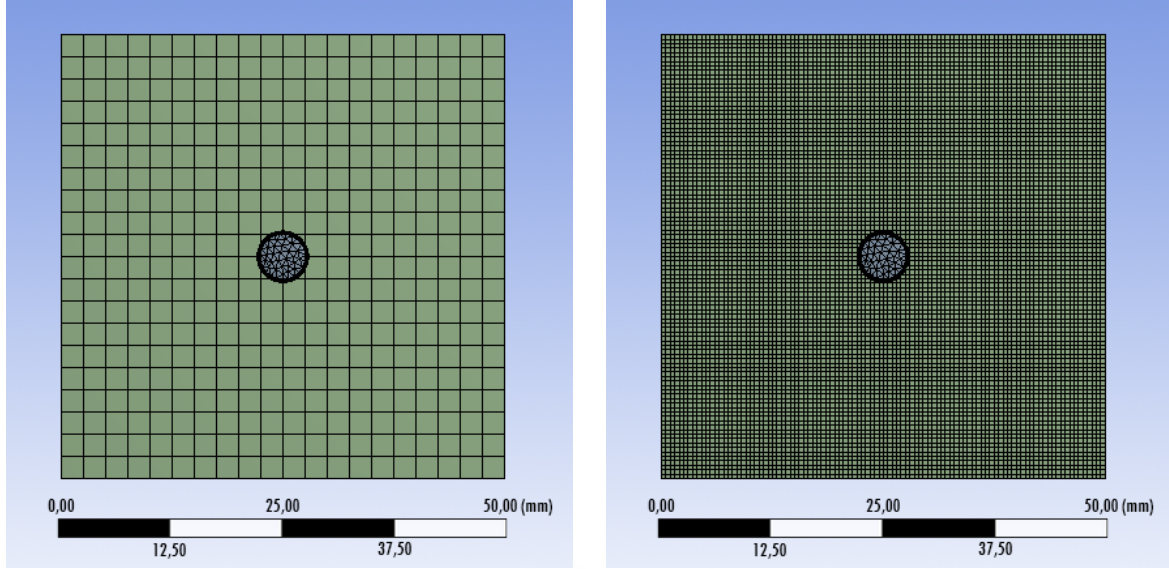
Bu doğrultuda analiz ayarları yapılırken; bitiş zamanını 0,2 milisaniye, bitiş döngüsü 1 milyon döngü, minimum zaman adımı 1E-23, referans enerji döngüsü 1E+09, olarak ayarlandığında analizler kesilmeden sağlıklı bir şekilde sonlanmaktadır. Deneysel çalışmanın sayısal modellemesi yapılırken bu ayarlar doğrultusunda analizler çalıştırılmış ve her 5E-04 milisaniyede bir kayıt altına alınmıştır.

Sayısal modelleme yapılırken en önemli etkenlerden biri sonlu elemanların boyutu ve sayısıdır. Eleman boyutları küçüldükçe analizlerin doğruluk oranı artmakta ve gerçeğe daha yakın sonuçlar vermektedir. Ancak, analiz süreleri bir hayli artmaktadır. Bu yüzden optimum eleman sayısını belirleyerek en kısa sürede olabilecek en doğru sonuçları elde etmek, sayısal modellemeler için önem teşkil etmektedir. Buna bağlı olarak Alumina (Al₂O₃) seramik zırh için de bu testin yapılarak optimum eleman sayısının belirlenmesi gerekmektedir.

Deneylerde kullanılan seramik karo boyutlarında Alümina seramik malzeme için bir eleman sayısından bağımsızlık analizi yapılmıştır. Bu analizde Alumina seramik karonun sonlu eleman boyutu, 2,5 mm'den 0,5 mm'ye kadar değiştirilmiştir.

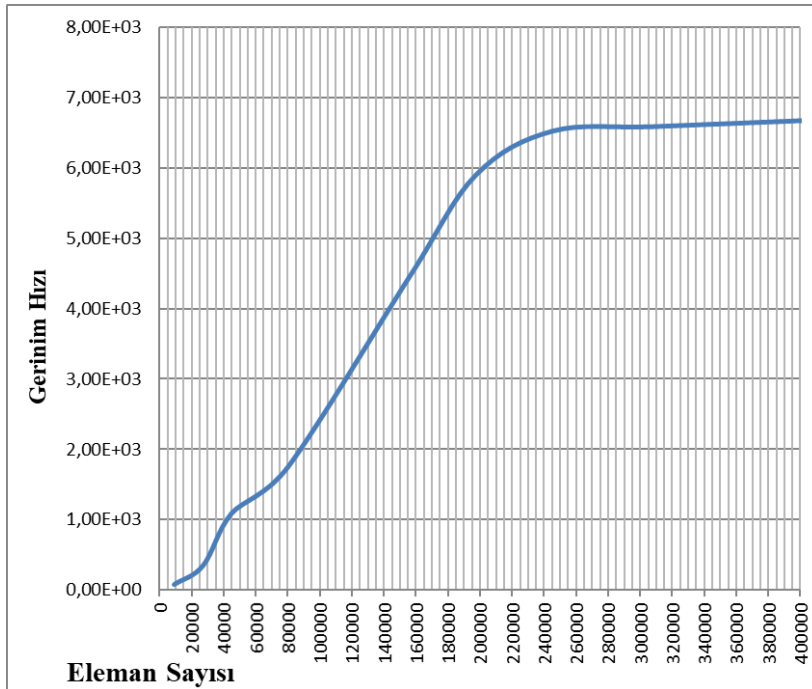
Şekil 3.5'te görülen 50x50 mm kare şeklindeki ve 10 mm kalınlığındaki tek bir alumina seramik karo üzerinde 2,5 mm boyutlu eleman sayısı 1 600 adet, 0,5 mm boyutlu eleman sayısı ise 200 000 adet olmaktadır. Buna göre de ön yüzeyi oluşturan seramik katmanda 2,5 mm boyutlu eleman sayısı 14 400 adet, 0,5 mm boyutlu eleman sayısı ise 1 milyon 800 bin adet olmaktadır.

Eleman sayısından bağımsızlık analizi yapılırken, eleman boyutu 0,5 mm'den 2,5 mm'ye kademeli olarak büyütülürken diğer tüm program girdileri ve malzeme özellikleri sabit tutulmuştur.

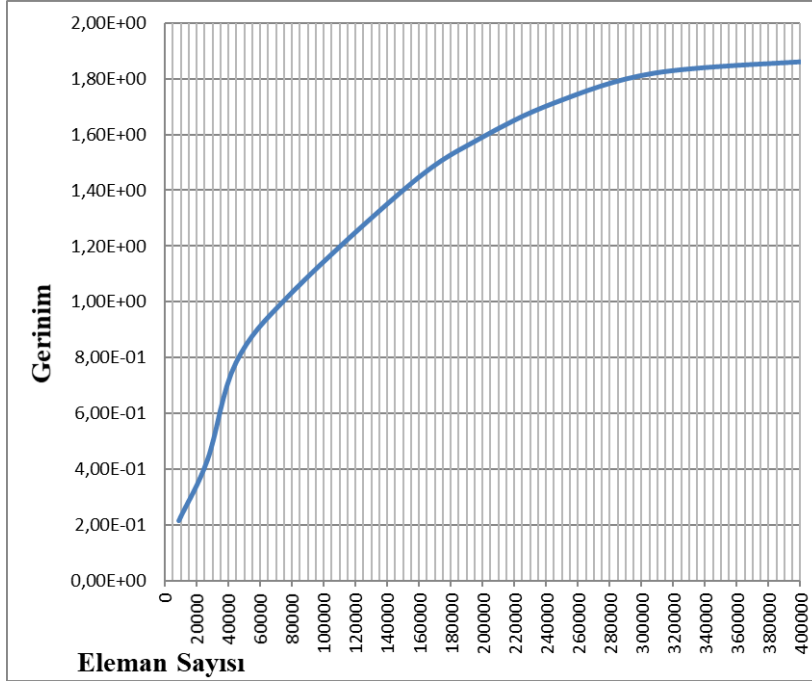


Şekil 3.5. 2,5 mm ve 0,5 mm boyutlu elemanlara bölünen seramik karolar

Zırhın çarpışma yüzeyi (y-z düzlemi) üzerinde merminin ilk temas ettiği nokta orjin olarak kabul edildiğinde ve merminin ilerleme eksenini pozitif x eksenini olarak ayarlandığında mm cinsinden (0, -10, +10) koordinatlarında bulunan bir noktadan ölçüm alınmıştır. Kayıt, yine çarpışma yüzeyini oluşturan yz düzlemindeki gerinim ve gerinim hızı değerleri üzerinden alınmıştır. Ayrıca kayıtlar, analiz esnasında aynı döngü ve zamanda alınarak Şekil 3.6 ve Şekil 3.7’de görülen grafikler oluşturulmuştur.



Şekil 3.6. Eleman sayılarına göre $1,8 \times 10^{-2}$ ms'deki gerinim hızı grafiği

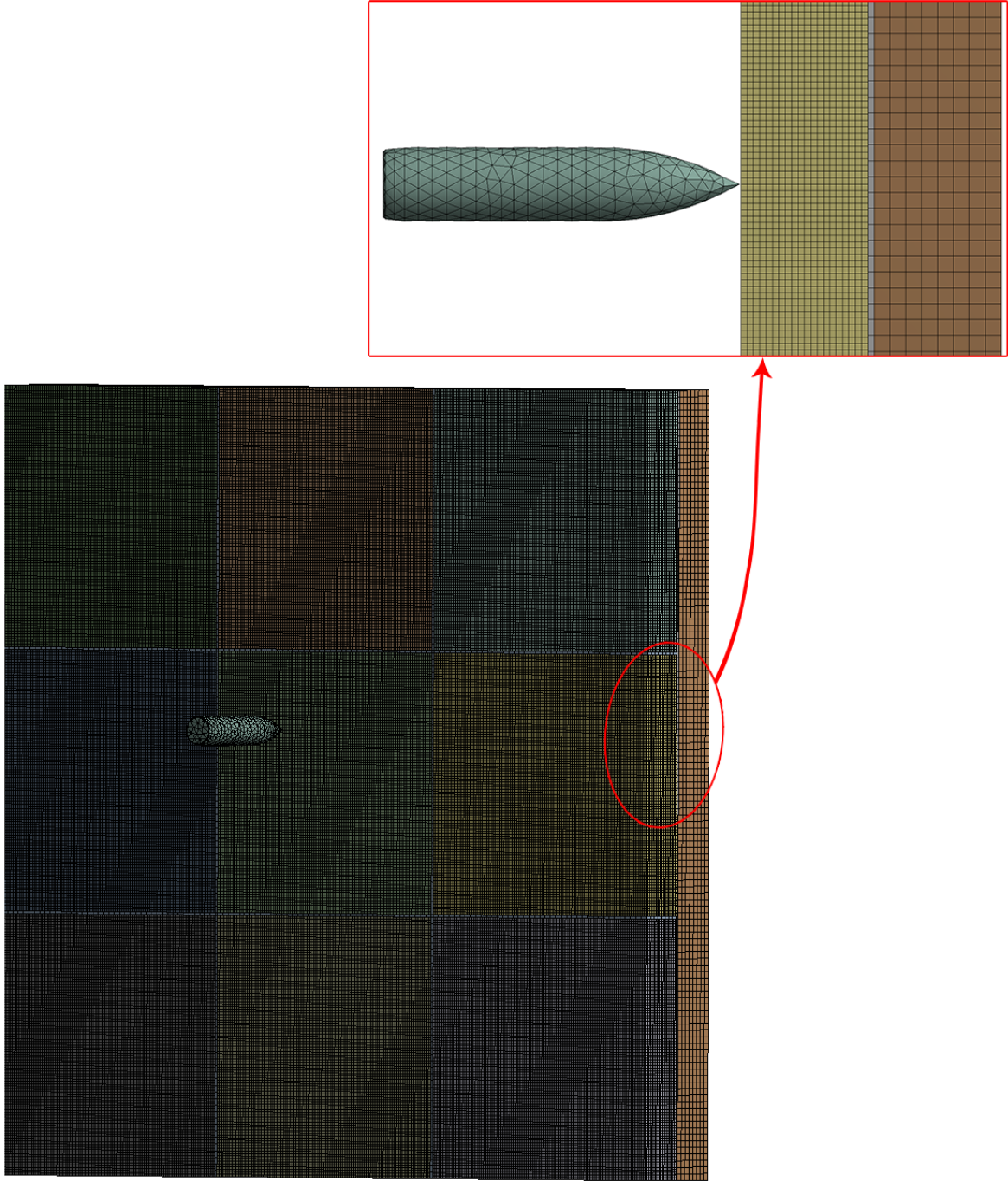


Şekil 3.7. Mesh sayılarına göre $1,8 \times 10^{-2}$ ms'deki gerinim grafiği

İki grafikten de görüleceği üzere elde edilen veriler 200 000 eleman sayısından sonra ihmal edilebilir bir değişim göstermektedir. Bu yüzden bu geometrik yapıda ve malzeme modelindeki optimum eleman sayısının 200 bin olarak kabul edilebileceği görülmektedir.

Analiz süreleri, simülasyonların yapıldığı i5 işlemciye ve 4 Gb belleğe sahip bilgisayar baz alındığında 100 000 döngü için, seramik katmandaki 14 400 eleman sayısı ile 1,5 - 2 saat sürerken, 1 Milyon 800 bin eleman sayısı ile 160 saatten fazla sürmektedir. Bu da optimum mesh sayısının belirlenmesinin ne kadar önemli olduğunu göstermektedir.

Bu doğrultuda son analizler yapılırken, asıl davranışı incelenmek istenen seramik karolar üzerindeki sonlu eleman boyutları 0,5 mm, polietilen destek tabakasındaki eleman boyutları 1 mm, mermi çekirdeği ve epoksi reçine tabakası üzerindeki eleman boyutları yine 0,5 mm olarak alınmıştır. Eleman boyutları bu şekilde alındığında, seramik katman üzerindeki eleman sayısı 1,8 milyon, tüm zırh sistemi ve mermi ele alındığında toplam eleman sayısı yaklaşık 2 milyon olmaktadır. Şekil 3.8'de bu boyutlarda sonlu elemanlara ayrılmış zırh sistemi ve mermi modellemesi görülmektedir.



Şekil 3.8. Analizlerde kullanılan 2 milyon sonlu elemana ayrılmış zırh sistemi

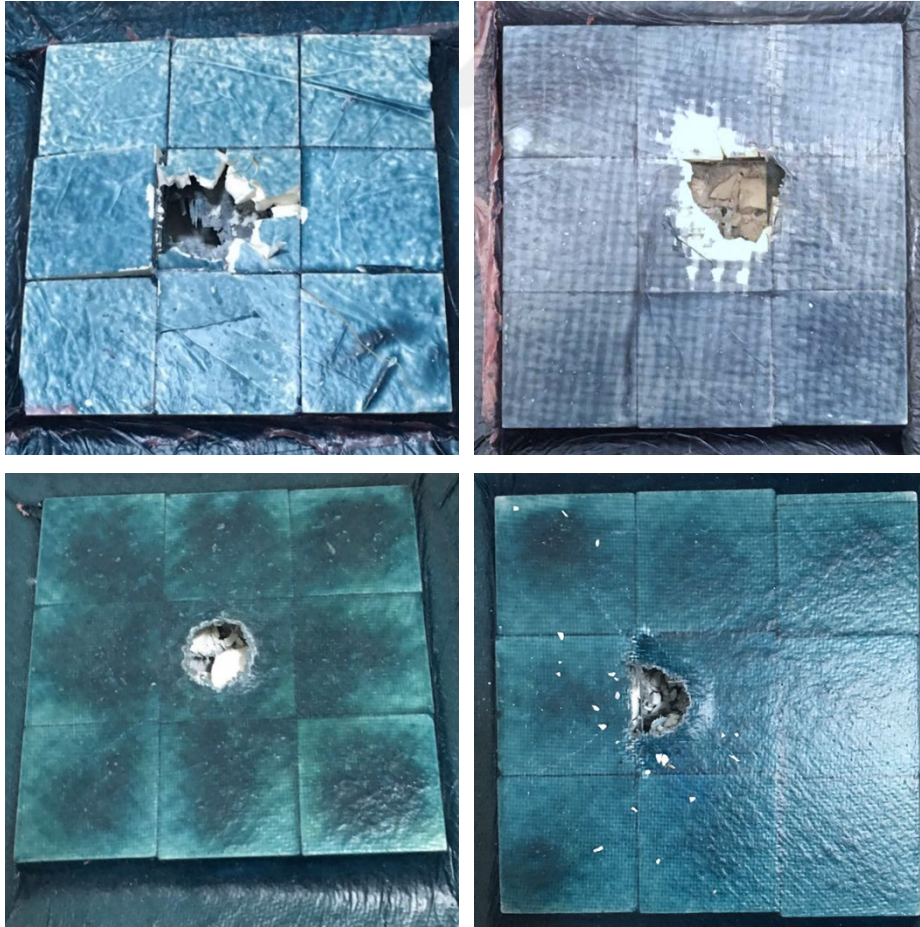


4. TEST VE ANALİZLERDE ELDE EDİLEN SONUÇLAR

Seramik önyüzlü polimer kompozit destekli zırh sisteminin 7,62 mm zırh delici mermi ile balistik testleri yapılmış ve ANSYS Autodyn yazılımı kullanılarak sayısal modellemeleri yapılmıştır. Materyal ve yöntem bölümünde detayları anlatılan test ve analizlerde elde edilen veriler ve sonuçlar devam eden maddelerde verilmiştir.

4.1. Balistik Teslerde Elde Edilen Sonuçlar

Al_2O_3 seramik önyüzlü polietilen kompozit zırh sistemlerinin 7.62 mm zırh delici mermi ile gerçekleştirilen balistik testleri sonucu mermi çekirdeğinin namludan çıkış hızları 835 m/s ile 838 m/s arasında ölçülmüştür. Atışlar sonrası mermi çekirdeklerinin isabet ettiği noktalar Resim 4.1’de gösterilmiştir. Mermi çekirdekleri genellikle, merkezde bulunan seramiklerin köşesine doğru bir noktaya isabet etmişlerdir.



Resim 4.1. Balistik testler sonucu deney numuneleri

Zırh delici mermi, sert seramik yüzeye çarptığında çelik çekirdeğin üzerindeki bakır ve kurşun tabakalar sıyrılmakta, merkezdeki ucu sivri çelik çekirdeğin ise ucu deforme olamakta ve hatta parçalanmaktadır. Mermi çekirdeğinde ve seramikte oluşan bu parçalanmaya, yüksek gerinim hızıyla birlikte oluşan ani çeki ve bası gerilmeleri neden olmaktadır. Atışta kullanılan merminin atıştan önceki hali ve atıştan sonra geriye kalan çelik mermi çekirdeğine ait görüntüler Resim 4.2’de verilmiştir.



Resim 4.2. 7.62mm x51 zırh delici mermi ve atış sonrası kırılan mermi çekirdeği

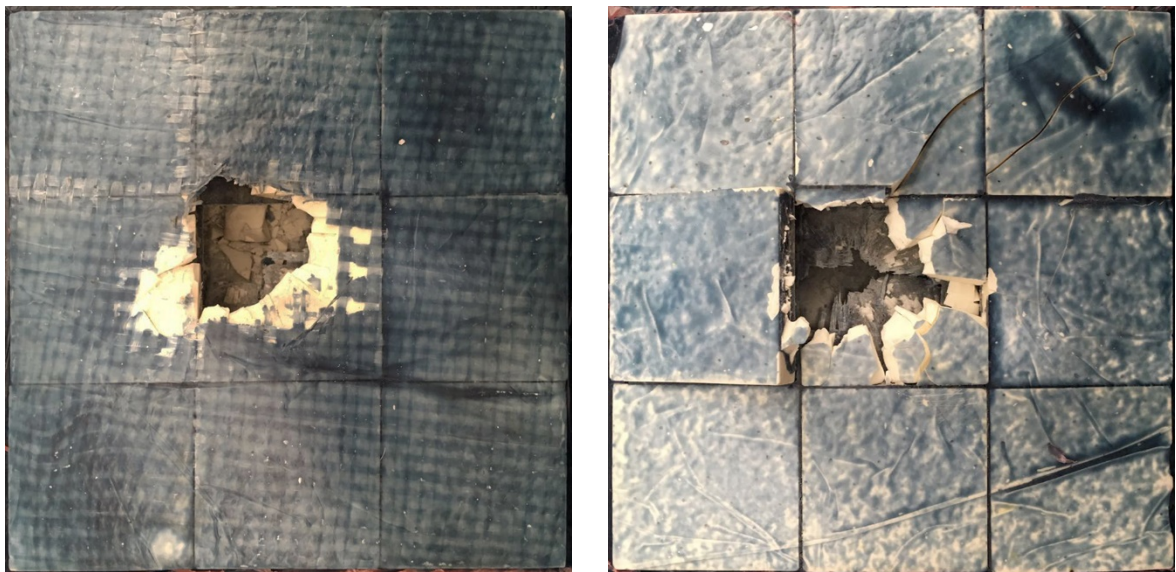
Literatürde yapılan çalışmalar dikkate alındığında, fiber takviyeli polimer kompozitlerin tek başlarına zırh delici mermiyi engelleyemediği ucunu deforme bile etmediği görülmektedir [61]. Buna göre, zırh sistemi oluşturulurken merminin çarpacağı ön yüzeyde seramik bir katman kullanılmasının koruma düzeyinde ne kadar fayda sağladığını göstermektedir.

Deneyler sonucu alümina seramik katmana kabaca bakıldığında ilk olarak, merminin isabet ettiği 1 numaralı seramiğin arka yüzeyinde kırılma konisinin oluştuğu dikkat çekmektedir.

Seramik üzerindeki kırılmalarında çarpışma noktasından itibaren radyal yönde oluştuğu görülmektedir. Dikkatli bakıldığında, komşu seramiklerde oluşan deformasyonun ise, çarpışma noktasına yakın olan kısım haricinde düşük seviyede kalarak, düzensiz kılcal çatlaklar şeklinde geliştiği seçilebilmektedir. Komşu seramik karolarda oluşan bu çatlakların balistik standartlarda istenildiği gibi, merminin kinetik enerjisinin emiliminde rol oynadığı ancak 100 mm'lik bir çap içerisinde kalarak komşu seramiklerin dışına etki etmediği için, ikinci bir tehdite karşı zırh sisteminin korumasını sürdürebileceğini göstermektedir.

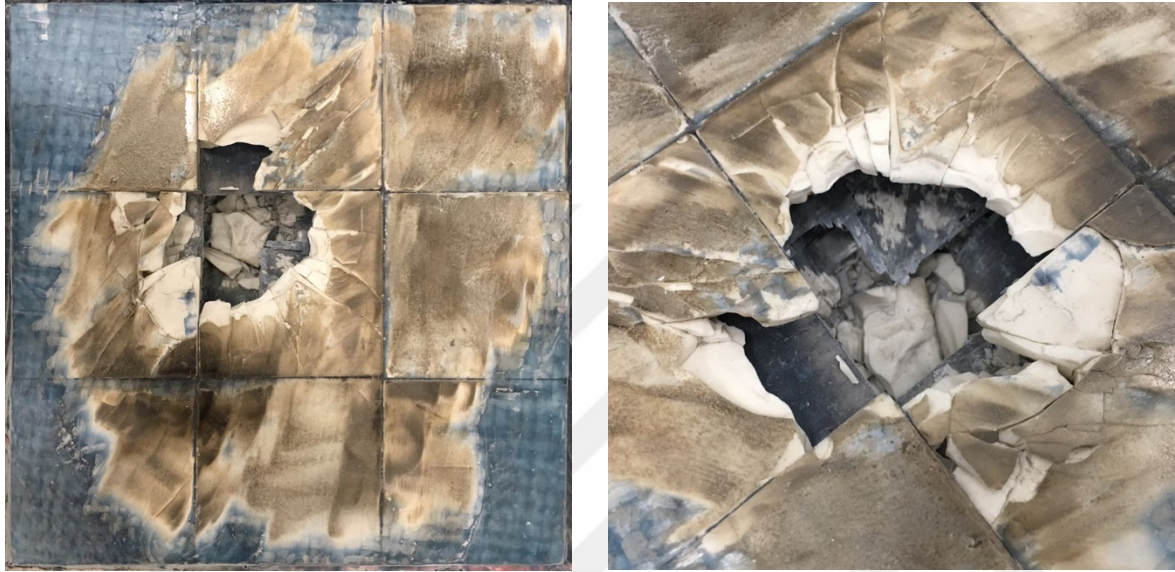
Çarpışma sonrası mermi ve seramikte deformasyon birlikte gelişmektedir. Seramiğin ön yüzünde oluşan kırılma sonucunda, kopan küçük parçalar zırhın dışına doğru fırlamaktadır. Seramik yüzeyin üzerine bir kat e-cam kumaş ilave edilmesi, seramikten ayrılan büyük parçaların dağılmasını ilave edilmeyene oranla daha fazla engellediği görülmüştür. Resim 3.4'te ön yüzeyine bir kat cam-fiber kumaş ilave edilmiş ve ilave edilmemiş zırh sistemi numunelerinin testler sonrasında elde edilen fotoğrafları görülmektedir.

Fotoğraflarda da açıkça üzerinde kumaş olmayan seramiklerden daha fazla parça koptuğu, hatta deformasyona uğramamış bir seramik karonun oluşan basıncın etkisiyle yapıştırıldığı yerlerden kurtularak zırhın bütününden ayrıldığı gözlenmektedir. Ön yüzeyine kumaş yerleştirilen sistemin ise oluşan deformasyonlara rağmen bütünlüğünü koruduğu görülmektedir.



Resim 4.3. Ön yüzeyinde bir kat kumaş bulunan ve bulunmayan zırh sistemleri

Resim 4.4'te yüzeyi kumaştan ayrılarak temizlenen seramikler görülmektedir. Zırh numunelerinin yüzeyleri temizlendiğinde çatlak oluşumları biraz daha belirginleşmiştir. Çarpışma noktasından kenarlara doğru oluşan radyal çatlaklar daha rahat görülmektedir. Hatta kumaş kaplı olan numunede daha büyük parçaların koptuğu, ancak kumaş tarafından tutulduğu gözlemlenmiştir. Kumaş ayrıldığında kopan bu parçalar da ana gövdeden ayrılmıştır.

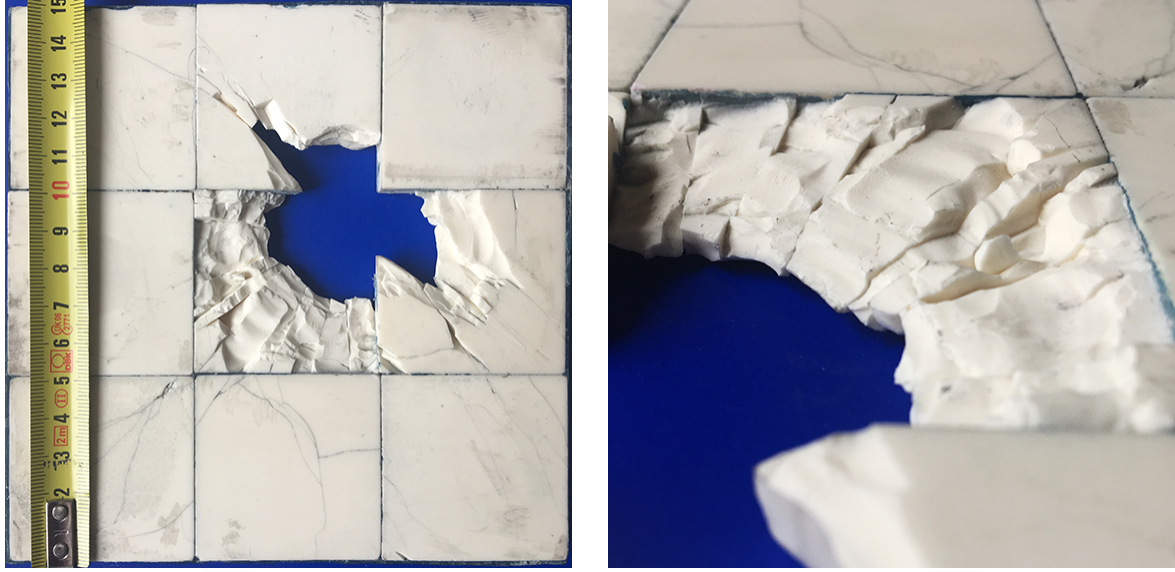


Resim 4.4. Kumaştan temizlenen seramik zırh ön yüzeyi

Seramik ön tabaka, zırh sisteminden ayrılarak arka yüzey incelendiğinde çarpışma sonucu oluşan kırılma konisi bariz bir şekilde görülmektedir. Zırh sisteminden ayrılan seramik tabakanın arka yüzeyinde meydana gelen kırılma dağılımı Resim 4.5'te gösterilmiştir.

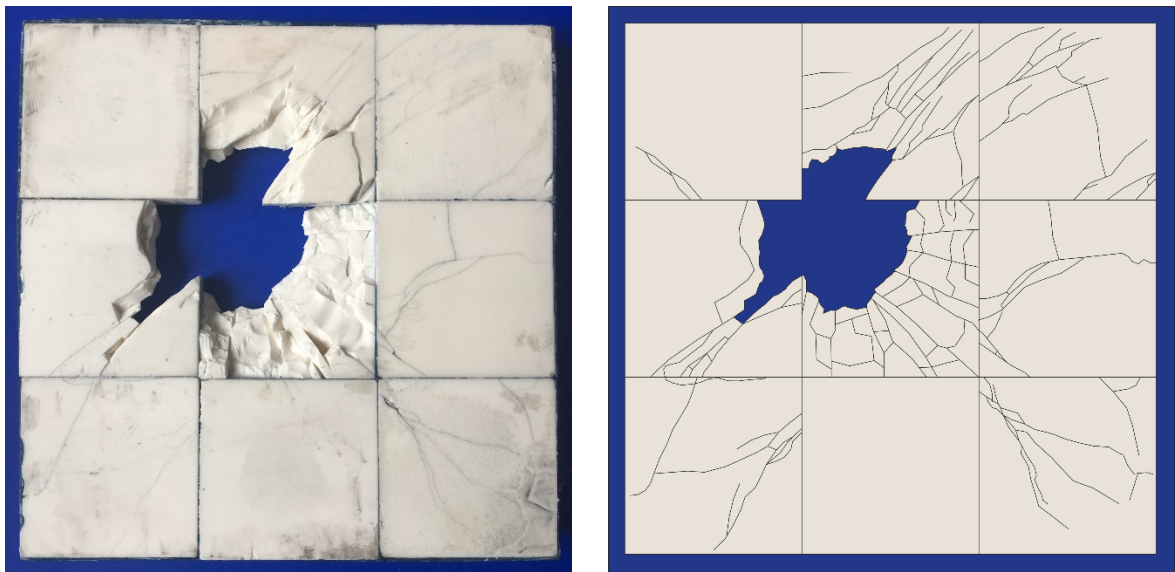
Resim 4.5'te görülen bu kırılma konisi, merkezde bulunan ve mermi çarpışmasına maruz kalan seramik karonun tüm arka yüzeyini kapsamaktadır. Ayrıca deformasyon komşu seramiklere kadar uzanmaktadır. Oluşan radyal kırıklar arka yüzeyde çok daha belirgidir. Çarpışma noktasına uzak çevre seramiklerde ise kırılmaya nazaran daha çok kılcal çatlaklar oluştuğu gözlemlenmiştir. Bu çatlaklar çoğunlukla gelişigüzel dağılmaktadır.

Merminin çarpması ile oluşan kırılmaların, çarpışmanın ilk gerçekleştiği seramikte ve 50 mm çapında bir alan içerisinde yoğunlaştığı görülmektedir. Kırılma konisi de bu alan içerisinde yoğun olarak oluşmakta ve merminin kinetik enerjisinin çok büyük bir kısmı bu kırılma sonucu absorbe edilmektedir.



Resim 4.5. Seramik katmanın arka yüzeyinde oluşan kırılma konisi

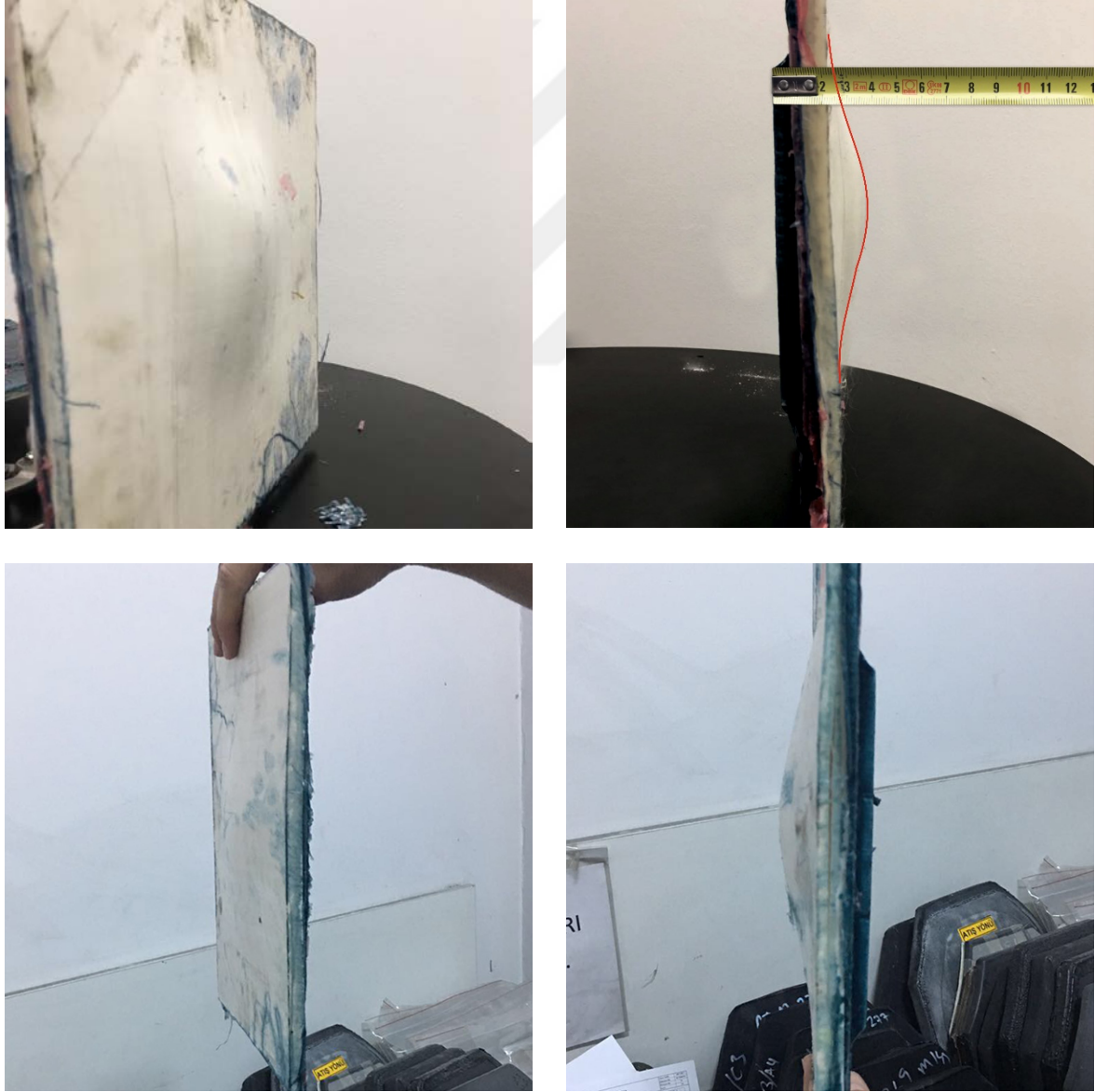
Çevre seramik karolardaki kılcal çatlak ilerleyişleri dikkate alındığında, çoğunlukla çatlakların 3'e 3 dizilimdeki seramik kompozisyonun dış kenarlarına kadar ulaşmadığı görülmektedir (Resim 4.6). Komşu seramiklerin bağlanma kuvvetleri, yüksek hızda çarpan mermiye karşı direnmek için merkez seramik karoya destek sağlamaktadır ve çarpışma sonrası merminin kinetik enerjisinin emilimine yardımcı olmaktadır. Çatlakların bir bölümü, penetrasyon sırasında seramik tabakasının eğilme deformasyonu nedeniyle de oluşabilmektedir.



Resim 4.6. Seramik katmanın arka yüzeyinde oluşan çatlak dağılımı

Çatlakların komşu seramik karoların dışına kadar etki göstermemesi, uygulamada oluşturulacak daha fazla seramik karoya sahip ve daha geniş alanlı bir alümina seramik tabakanın tamamının hasar görmeyeceğini ve standartlarda beklenen çoklu atış performansına göre istenilen korumayı sağlayabileceğini kanıtlar niteliktedir.

Tabanca, otomatik tabanca, piyade tüfeği ve benzeri gibi hafif silahlara karşı kullanılan zırh sistemleri için belirlenen standartlara (NIJ, STANAG...) göre, zırhı kullanacak personelin hayati organlarını koruyabilmesi için zırh arka yüzeyinde meydana gelecek çöküntü miktarının 44 milimetreyi geçmemesi gerekmektedir.



Resim 4.7. Kompozit zırh sistemlerinin arka yüzeylerinde oluşan çöküntü miktarları

Yapılan deneyler sonucunda, seramik önyüzlü kompozit zırh sisteminin arka yüzeyinde bulunan poli-etilen kompozit tabakada oluşan çöküntü miktarının 18 ilâ 20 mm arasında değiştiği görülmektedir (Resim 4.7). Elde edilen bu değerler de, istenilen uluslararası personel koruma standartlarına uygun olduğundan, oluşturulan zırh sistemi kompozisyonunun gerekli korumayı sağlayabilecek ve tercih edilebilir bir kompozisyon olduğu anlaşılmaktadır.

Genel olarak deney sonuçlarına bakıldığında; oluşturulan alümina seramik önyüzlü, ultra yüksek molekül ağırlıklı polietilen kompozit destek plakalı ve epoksi reçine ile birleştirilmiş zırh sisteminin standartlar çerçevesinde istenilen özellikleri sağladığı görülmektedir.

4.2. Sayısal Modellemelerde Elde Edilen Sonuçlar

Bölüm 3.3'te ifade edilen ayarlar doğrultusunda yapılan analizler sırasında öncelikli olarak epoksi reçine ile tüm diğer parçalar arasında “bonded” kontak tipi tanımlanmıştır. Bu şekilde tanımlanan bağlantıda her iki yüzey de çok güçlü bir yapıştırıcıyla yapıştırılmış gibi davranmakta ve yüzeylerde ne ayrılma ne de kayma meydana gelmektedir. Bu şekilde gerçekleştirilen analizler sonucu, polietilen tabaka üzerinde çukurlaşma meydana geldiği sırada, seramik tabaka ile birbirinden ayrılmadığı görülmüştür. Bu bütün olarak hareket nedeniyle seramik tabaka, arka yüzeydeki sünek kompozit destek tabakası ile birlikte konkav şekil değiştirme eğiliminde bulunmuştur. Bu nedenle, oldukça kırılğan yapıya sahip olan seramiklerin polietilen tabaka ile temas halinde olan tüm yüzeylerinin oluşan aşırı gerilmeden dolayı parçalandığı görülmüştür.

Gerçekleştirilen balistik testlerde ise, yüksek hızda seramik yüzeye çarpan merminin arka yüzeylerde meydana getirdiği yüksek boyutlardaki anlık normal gerilmeler nedeniyle zırh katmanları arasında ayrılmalar meydana geldiği görülmüş, ancak seramik katmanın arka yüzeyinde kırılma konisi dışında tüm yüzeye dağılan bir deformasyon görülmemiştir. Bonded kontak tipi kullanılan analizlerde, test sonucu elde edilen davranış şekinden uzak bir sonuç oluşunca, bağlantı tanımlarında değişikliğe gidilmiştir.

Ansys programı içerisinde bonded kontak tipi dışında, ayrılma olmayan (no separation), kaba (rough), sürtünmesiz (frictionless) ve sürtünmeli (frictional) olmak üzere dört farklı kontak tipi daha mevcuttur. Ayrılma olmayan kanta tipi bonded kontak tipine oldukça

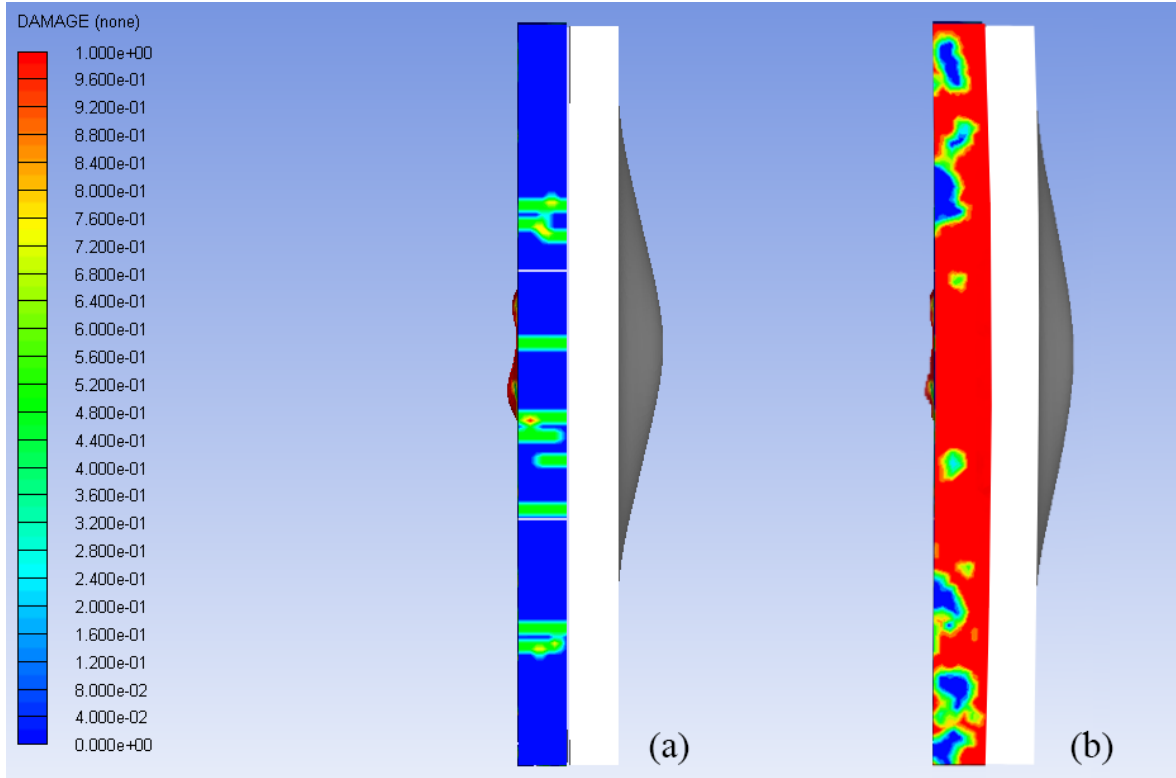
benzemektedir, fakat yüzeylerin kaymasına çok az miktarda izin verilir. Rough kontak tipinde yüklemeye göre yüzeylerin ayrılmasına izin verilmekte fakat hiçbir şekilde kayma olmamaktadır ($\mu_f = \infty$). Sürtünmesiz kontak tipinde tanımlanan yüzeyler aralarında sürtünme olmaksızın kayabilmektedir ($\mu_f = 0$) ve ayrıca yükleme tipine göre yüzeylerin ayrışıp birleşmesine de izin verilmektedir. Son olarak sürtünmeli kontak tipinde ise yüzeylerin kullanıcının belirlediği bir sürtünme katsayısı dahilinde kaymasına izin verilmektedir ($\mu_f = \text{kullanıcı tanımlı}$). Kayma, sürtünme katsayısına bağlı kesme kuvvetinin eşik değerini geçer geçmez gözlemlenmektedir. Bu kontak tipleri ve özellikleri çizelge 4.1’de bir araya toparlanmıştır.

Çizelge 4.1. Kontak tipleri ve özellikleri

<i>Kontak tipi</i>	<i>Yüzeyler arası ayrılma</i>	<i>Yüzeyler arası kayma</i>
Bonded	Hayır	Hayır
No separation	Hayır	Evet ($\mu_f = 0$)
Rough	Evet	Hayır ($\mu_f = \infty$)
Frictionless	Evet	Evet ($\mu_f = 0$)
Frictional	Evet	Evet (kayma kuvveti $> \mu_f$)

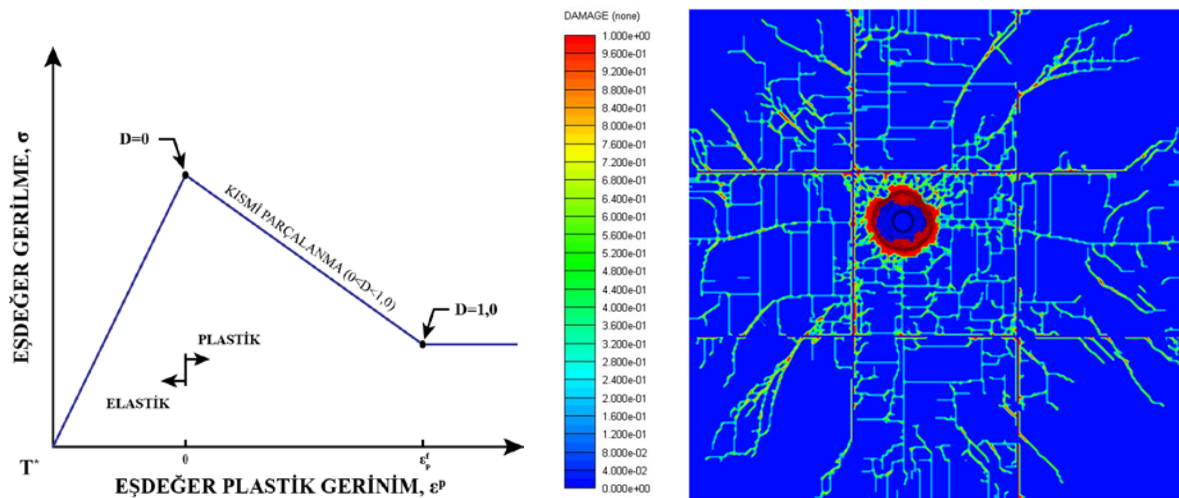
Analizlerde elde edilen sonuçlarda gerçeğe uygunluk açısından, katmanların aşırı yüklemeler sonucu ayrılmaları beklenmektedir. Ancak test sonuçlarına göre yapıştırılan katmanlar arasında herhangi bir kayma izine rastlanmamıştır. Buna bağlı olarak yeni yapılan düzenlemede seramik karoların birbirleri ile arasında yer alan epoksi reçine tabakası ile olan kontak tipleri yine bonded olarak atanmış, ancak seramiklerin polietilen kompozitle arasında yer alan epoksi reçine tabakasıyla olan tüm bağlantılar rough kontak tipinde tanımlanmıştır. Bu şekilde merminin etkisine göre katmanların birbirinden ayrılmasına izin verilebilecektir ve gerçeğe daha uygun bir analiz gerçekleştirilebilecektir.

Bu şekilde ayarlanan sınır şartlarına göre gerçekleştirilen analizlerden elde edilen sonuçlarının, beklendiği gibi deney sonuçlarında elde edilen davranışa çok daha yakın çıktığı gözlemlenmiştir. Şekil 4.1’de yukarıda anlatıldığı şekilde bonded ve rough bağlantı tipleri kullanılarak modellenen zırh sistemlerinin aynı zaman diliminde oluşan hasar davranışları gösterilmiştir.



Şekil 4.1. 0,12 ms’de (a) rough ve (b) bonded kontak tiplerine göre analiz sonuçları

Seramiklerin balistik davranışı incelenirken, genellikle polinom hal denklemleri ile birlikte Johnson Holmquist malzeme modeli kullanılmaktadır. Tez kapsamında yapılan analizlerde de bu malzeme modeli tercih edilmiştir. Bu malzeme modelinde, Şekil 4.2’de görüldüğü ve daha önceki bölümlerde anlatıldığı üzere malzemenin akmaya başlaması ile birlikte plastik deformasyon oluşumu ve hasar oluşumu gözlenmektedir.

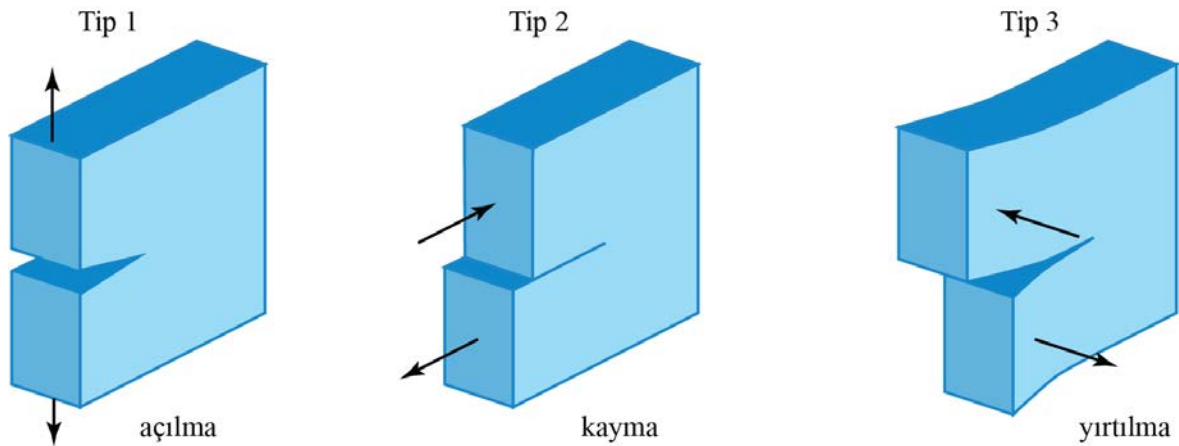


Şekil 4.2. Hasar ve kırılmanın oluşumu

Hasarın henüz oluşmadığı ($D=0$) bölgeler, elastik sınırlar içerisinde kalmaktadır. Plastik deformasyon başladığında yani malzeme akmaya başladığı anda hasar oluşumu ($0<D<1$) da başlamaktadır.

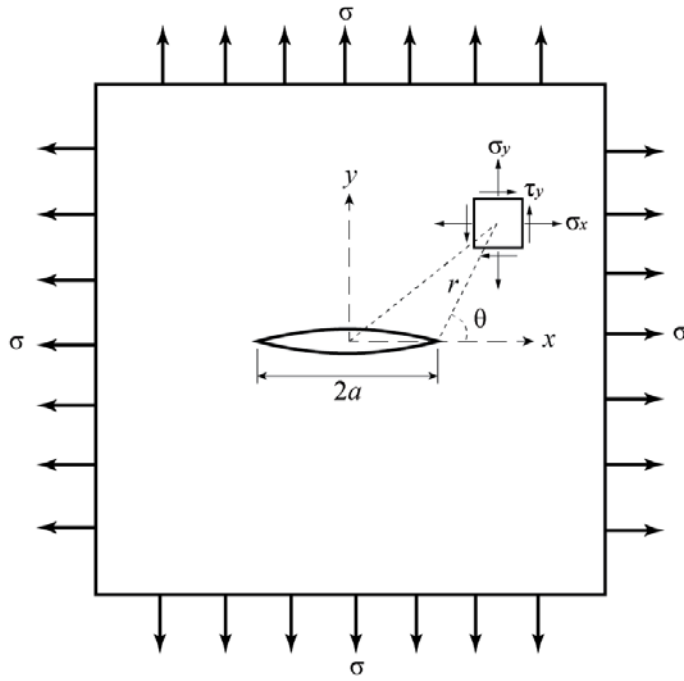
Plastik deformasyon ve hasar oluştuğunda, renk skalasındaki değişim doğrultusunda analiz sonuçlarında da değişim görülmektedir. Malzeme dayanımı kopma noktasına ulaştığında yani hasar maksimum değerine ulaştığında ($D=1$), kırılma ve kopma meydana gelmektedir. Bu elemanların renkleri kırmızı ile gösterilmektedir. Analiz sonuçlarında seramik üzerinde kırmızı renkle gösterilen bölgeler dışında, renk değişimleri oluşan yerlerde hasarın minimum ve maksimum değerleri arasında olduğunu, yani kalıcı deformasyonun olduğu ancak kopma ve kırılma meydana gelmediği anlaşılmaktadır. Bu da gerçekte o bölgelerde bir çatlak oluşumunun başladığını göstermektedir.

Kırılma bir gövdenin ergime noktasının altındaki bir sıcaklıkta, gerilmenin etkisiyle parçalara ayrılmasıdır. Üç tip kırılma vardır. Bunlardan birincisi normal gerilmeler altında oluşan açılma, ikincisi düzlemsel kayma gerilmesi sonucu oluşan kayma, üçüncüsü ise enine kayma gerilmesi nedeniyle oluşan yırtılma.



Şekil 4.3. Kırılma tipleri

Seramikler gibi gevrek malzemelerde kırılmaya genellikle normal gerilmeler neden olmaktadır. Gevrek malzemelerin kırılmasında, çatlak yayılması çok hızlı olmaktadır ve çatlak uygulanan gerilmeye neredeyse dik yayılmaktadır.



Şekil 4.4. Kırılma mekaniği

Kırılma mekaniğinde Griffith teoremine göre çatlak oluşan bir malzemenin kırılmadan dayanabileceği gerilme,

$$\sigma_f = \left(\frac{2\gamma E}{\pi a} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4.1)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada, σ_f kırılma gerilmesi, γ yüzey enerjisi, E elastisite modülü ve a çatlak boyunun yarısıdır. Yüzey enerjisi teriminin yerine $G_c = \gamma^2$ şeklinde kırılma işini gösteren bir parametre kullanılmaktadır. Bu şekilde eşitlik yeniden yazıldığında,

$$\sigma_f = \left(\frac{G_c E}{\pi a} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4.2)$$

şeklini alır. Bu formülasyondan yola çıkan Irwin teoremine göre ise çatlak ucunda oluşacak gerilmelerin hesabından bir şiddet faktörü geliştirilmiştir.

$$\sigma_f \sqrt{\pi a} = \sqrt{E G_c} \quad (4.3)$$

Bu eşitliğin sol tarafındaki değer, sağ taraftaki değere ulaştığında çatlak ilerlemesi olacağını göstermektedir. Eşitliğin sol tarafı çatlak ilerlemesi için gereken gerilme ölçüsü olarak alınmaktadır ve “gerilme şiddet faktörü” olarak adlandırılmakta ve K_I ile gösterilmektedir.

$$K_I = \sigma_f \sqrt{\pi a} \quad (4.4)$$

Bu faktörün kırılmanın başladığı kritik değerine ise “kırılma tokluğu” adı verilmekte ve K_{IC} ile gösterilmektedir.

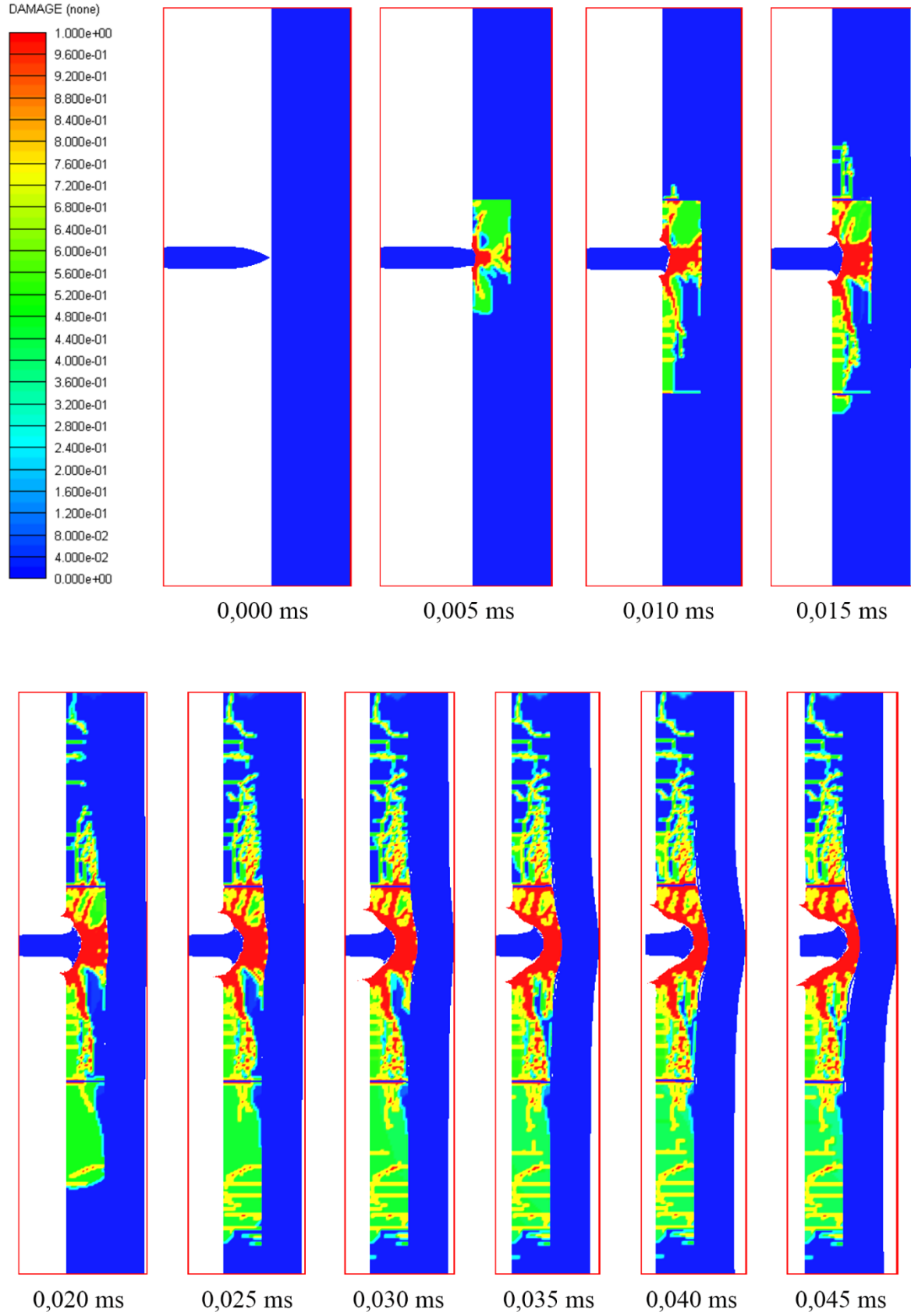
$$K_{IC} = \sqrt{E G_c} \quad (4.5)$$

Bu iki eşitliğe göre, $K_I = K_{IC}$ olduğunda çatlak ilerlemesi oluşmaktadır. Çatlak boyu a büyüdükçe hasara neden olan gerilme miktarı azalmaktadır.

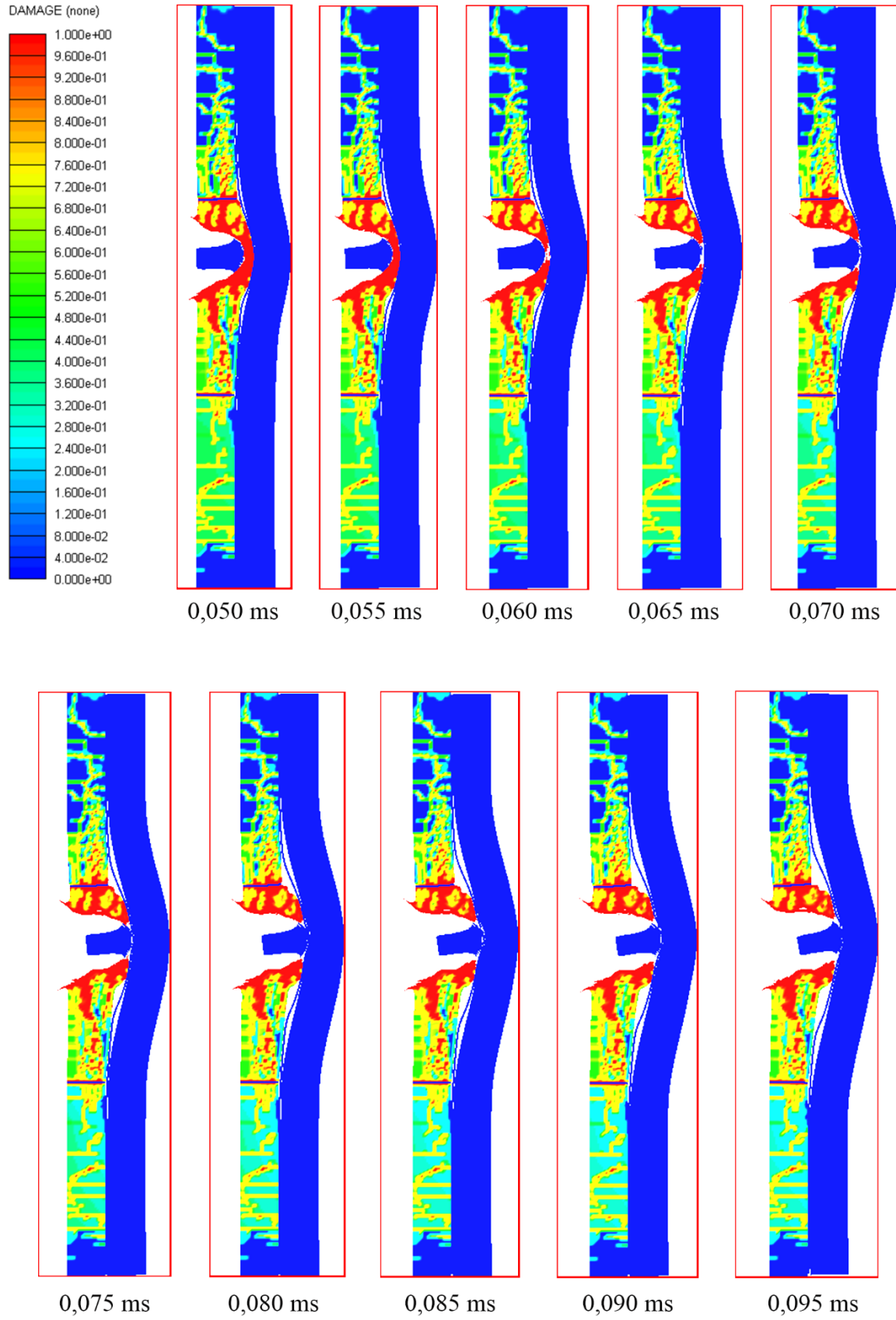
Deneyleri yapılan seramik önyüzlü polietilen destek katmanlı zırh sisteminin modellenmesi sonucu elde edilen veriler sonucunda, 0,005 milisaniye aralıklarla alınan x-y düzlemindeki kesit resimleri Şekil 4.3’te, x-z düzlemindeki kesit resimleri ise Şekil 4.4’te gösterilmiştir.

x-y ve x-z düzlemleri üzerinde çarpma noktasından alınan kesitlerde görüldüğü gibi mermi merkezde yer alan seramiğe çarptıktan çok kısa bir süre sonra hasar, bu seramik karonun tamamına yayılmaktadır. Hasar değeri sıfırdan bire kadar değiştiği göz önünde bulundurulduğunda kırmızı olarak görünen noktalar, değeri bir olan yani tamamen hasara uğramış noktalar.

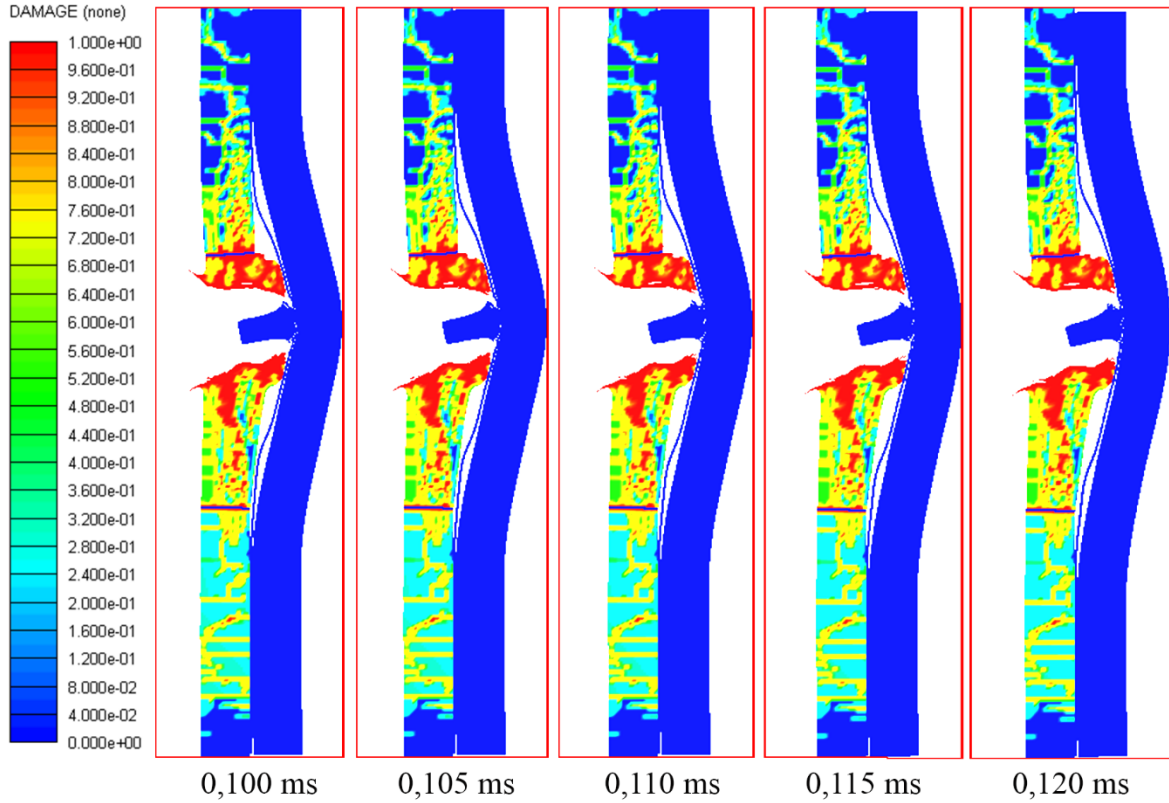
Darbe oluştuktan sadece 0,005 milisaniye sonra merminin ucunun neredeyse tamamen düzleştiği görülmektedir. Mermi ucu köreldikten sonra kinetik enerjisinin büyük bir kısmını kırılma konisinin oluşumu ve seramik tabakadaki penetrasyon sırasında harcamaktadır. Kırılma konisi oluşmaya başladıktan sonra, yaklaşık 0,020’nci milisaniyede merminin önündeki yer alan bölüm tamamen parçalanmakta ve ufalanan seramik parçaları mermi ile birlikte hareket ederek arkadaki esnek polietilen tabaka üzerinde çöküntü başlamasına neden olmaktadır. Bu esnada seramik, epoksi ve polietilen katmanlar arasında ayrışma ve delaminasyon oluşumu başlamaktadır.



Şekil 4.5. x-y düzleminde çarpışma noktasının kesitinde hasar oluşumu



Şekil 4.5. (devam) x-y düzleminde çarpışma noktasının kesitinde hasar oluşumu

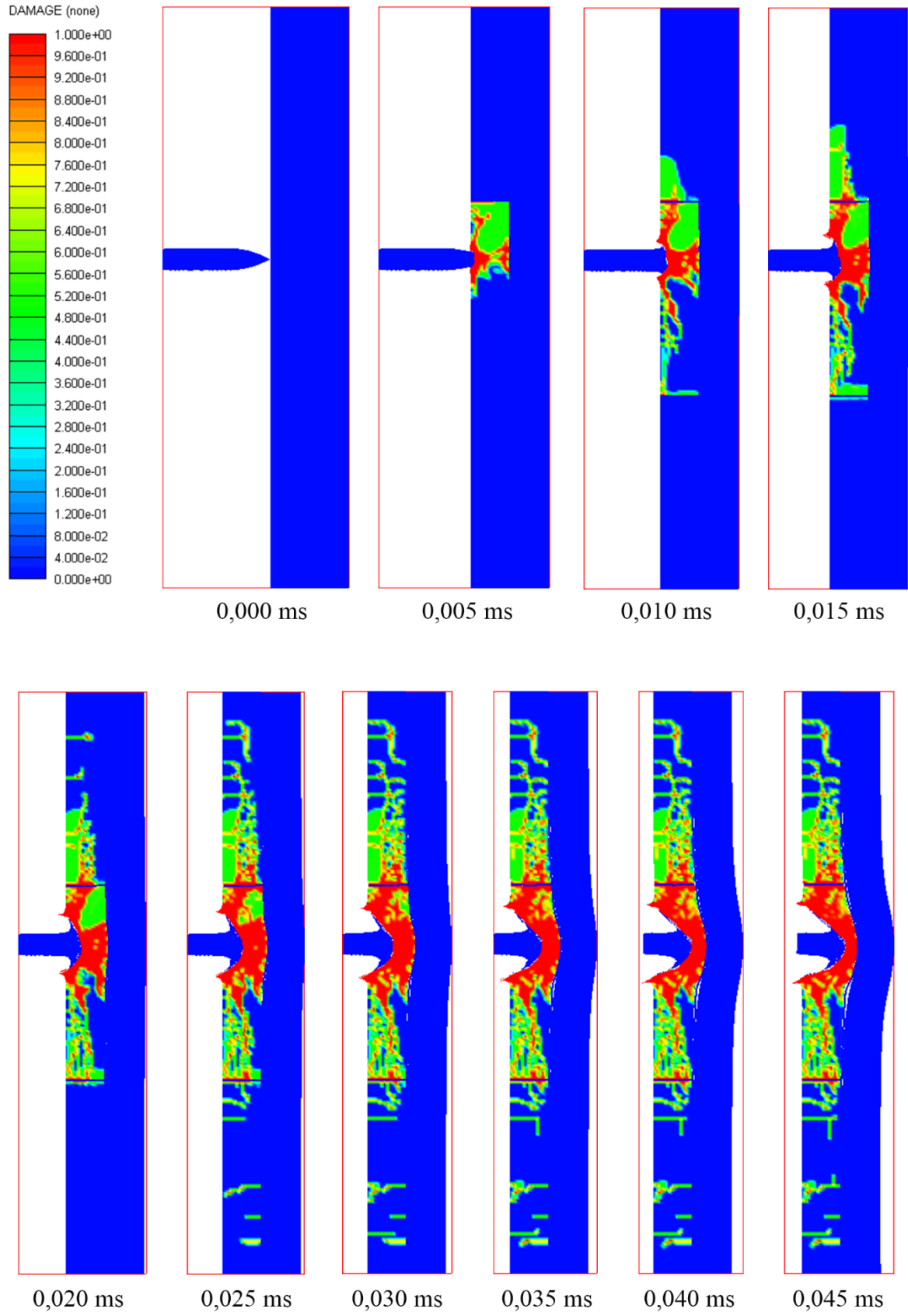


Şekil 4.5. (devam) x-y düzleminde çarpışma noktasının kesitinde hasar oluşumu

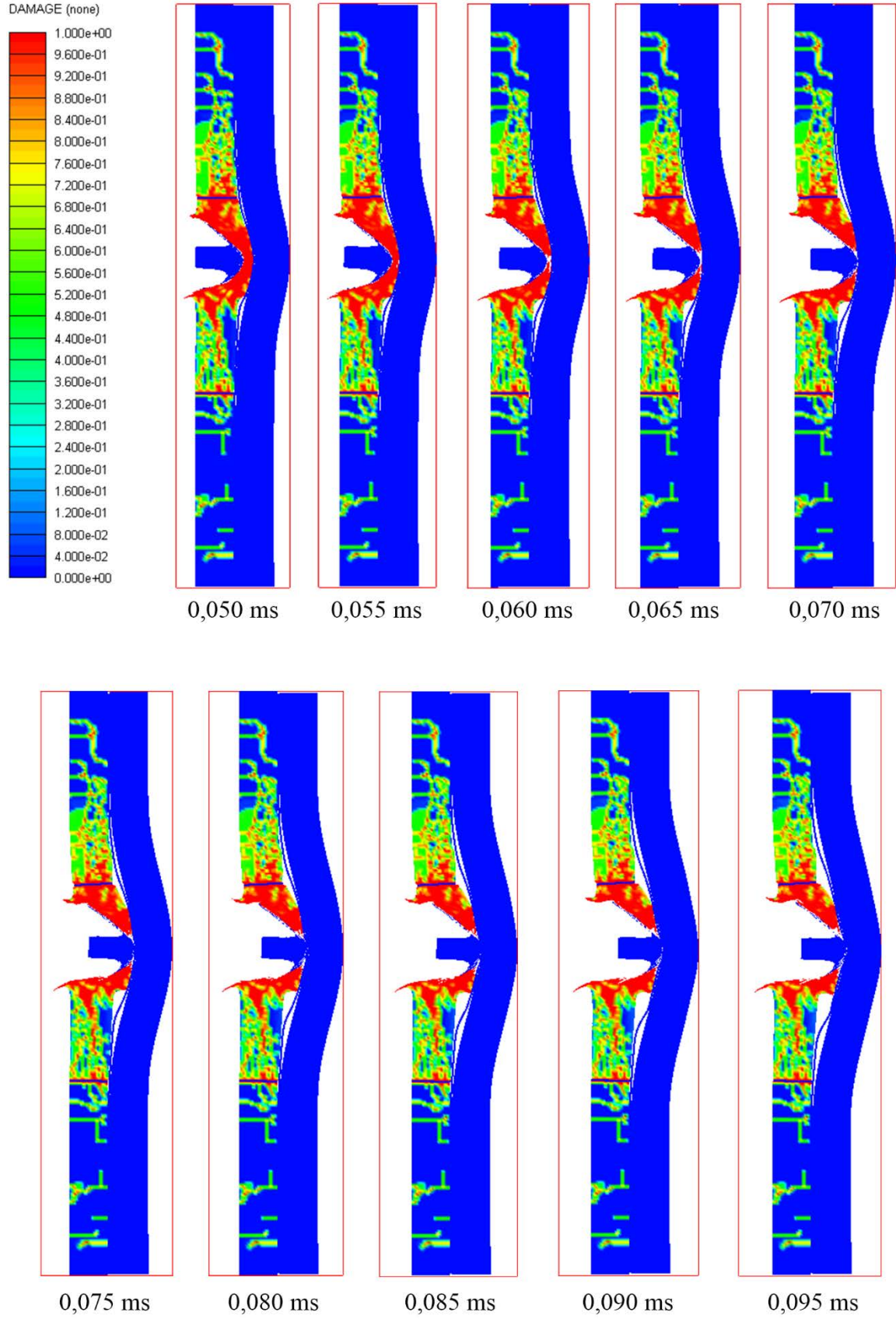
Yaklaşık 0,070'inci milisaniyede seramik tabakada perforasyon gerçekleşmekte, mermi destek tabakası olan polietilen tabakaya ulaşmaktadır. Merminin artık kinetik enerjisi bu tabakada meydana gelen çöküntü sırasında tamamen emilmektedir. Destek tabakasında oluşan bu deformasyon ve çöküntü miktarı, deneylerde elde edilen sonuçlarla karşılaştırıldığında birbirlerine çok yakın oldukları gözlemlenmiştir.

Darbe gerçekleştikten 0,12 milisaniye sonra merminin neredeyse tamamen durduğu görülmektedir. Bu anda seramik tabaka üzerinde perforasyon, polietilen tabaka üzerinde ise kısmi penetrasyon ve çöküntü oluşumu gözlemlenmektedir.

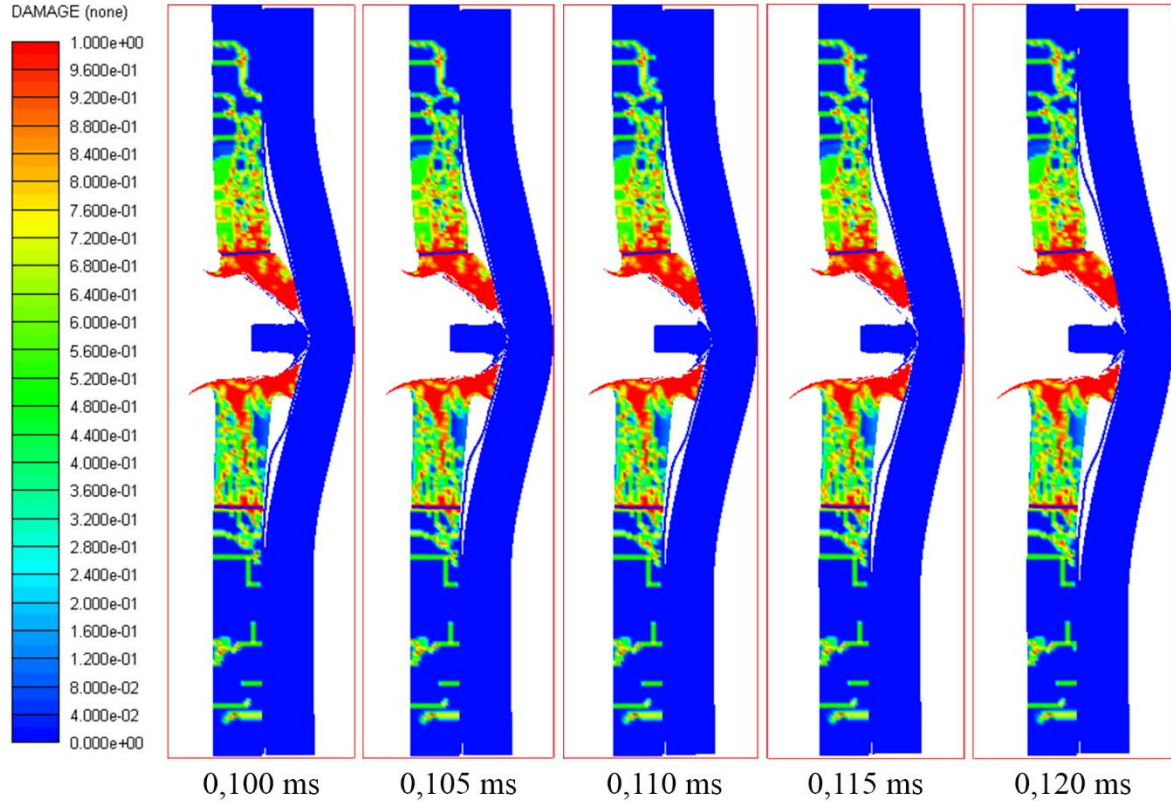
Zırh modeli görevini tamamlayıp mermiyi tamamen durdurarak etkisiz hale getirdiğinde destek tabakası olarak kullanılan poli-etilen katmanın, çarpışma noktasından başlayarak kenarlara doğru neredeyse tamamen seramik katmandan ayrıldığı net bir şekilde görülmektedir. Test numuneleri de, atışlar sonrası aynı davranışı göstermekte ve iki katman neredeyse tamamen birbirlerinden ayrılmaktadır.



Şekil 4.6. x-z düzleminde çarpışma noktasının kesitinde hasar oluşumu



Şekil 4.6. (devam) x-z düzleminde çarpışma noktasının kesitinde hasar oluşumu

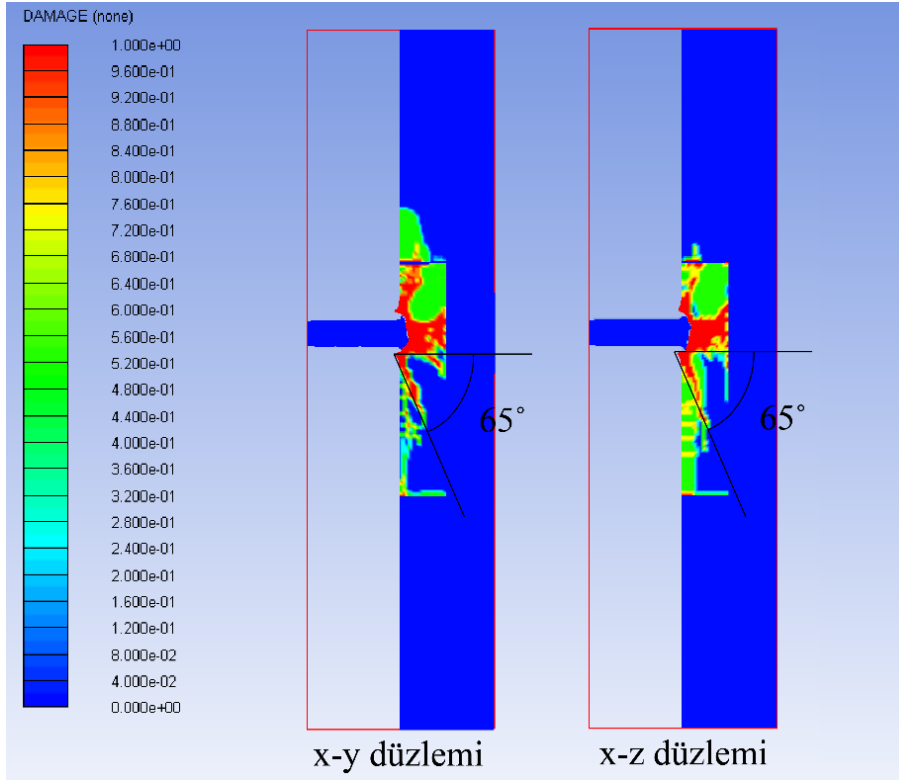


Şekil 4.6. (devam) x-z düzleminde çarpışma noktasının kesitinde hasar oluşumu

Kırılma başladıktan sonra deformasyonun, konik bir biçimde seramiğin arka yüzeyine doğru ilerlediği görülmektedir. Zaera, Sánchez-Sáez, Pérez-Castellanos ve Navarro çalışmalarında, kırılma konisi oluşumu sırasında, çarpışma eksenini ile kırılma konisinin yaptığı açının yaklaşık olarak 65 derece alınabileceğinden bahsetmektedirler [44].

Bu tez kapsamında yapılan analizlerde de kırılma konisi oluşumunun Şekil 4.7’de görüldüğü gibi 65 derece civarında olduğu görülmektedir. Bu da Analizin, kırılma konisinin oluşumu, dağılımı ve boyutları bakımından literatürde beklenen eğrlere yakın bir davranış sergilediğini göstermektedir.

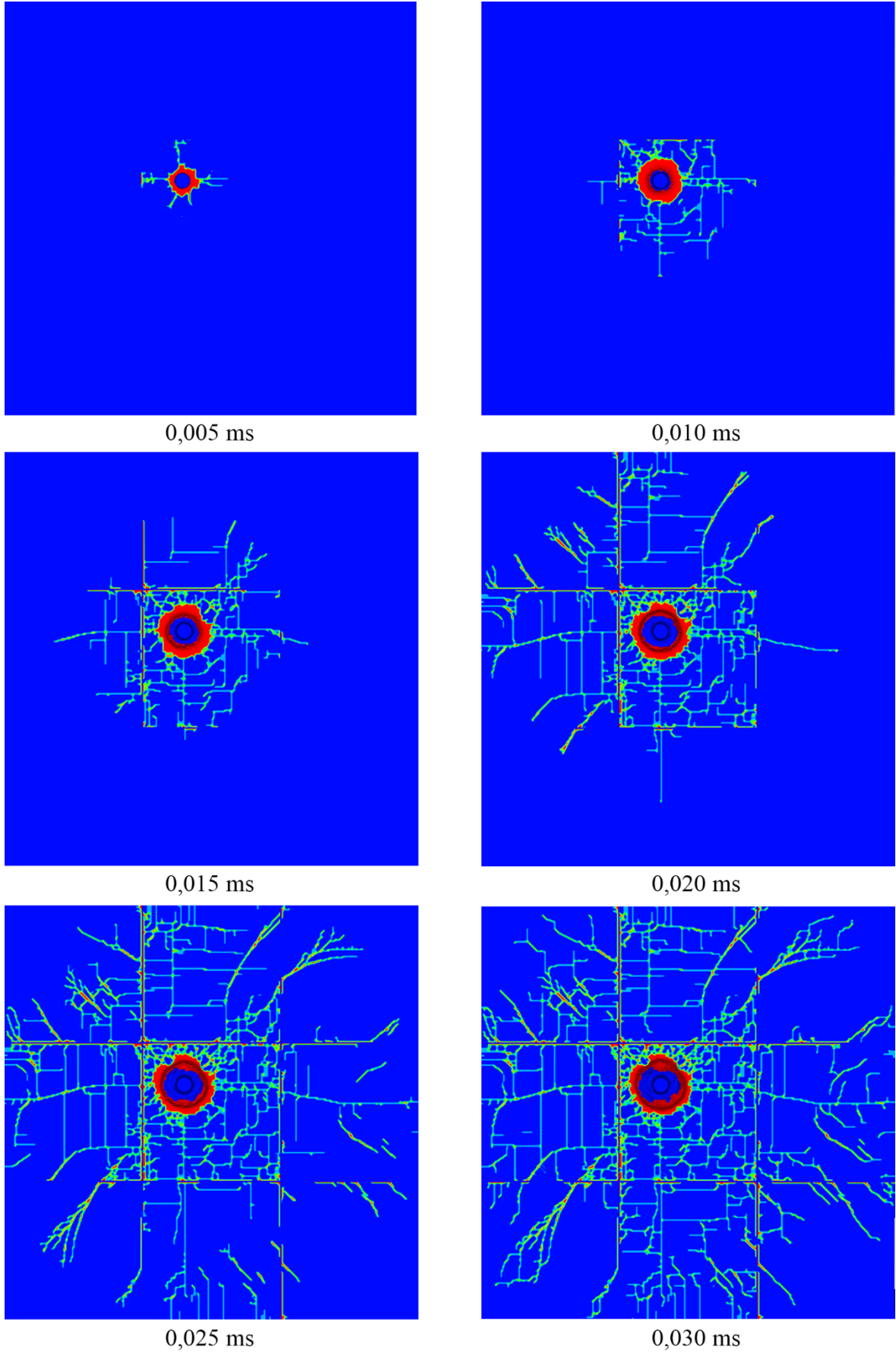
Yapılan sayısal analiz sonuçları, çarpışma noktasında x-y ve x-z düzlemlerinde kesit alınarak incelendiğinde; hasar oluşumu, mermi deformasyonu, kırılmanın yayılımı, kırılma konisi oluşumu, deformasyon bölgesinin çapı, katmanların ayrılması, sünek destek tabakasındaki çöküntü oluşumu ve bu oluşumun boyutları bakımından deneysel sonuçlarla çok büyük oranda örtüşmektedir.



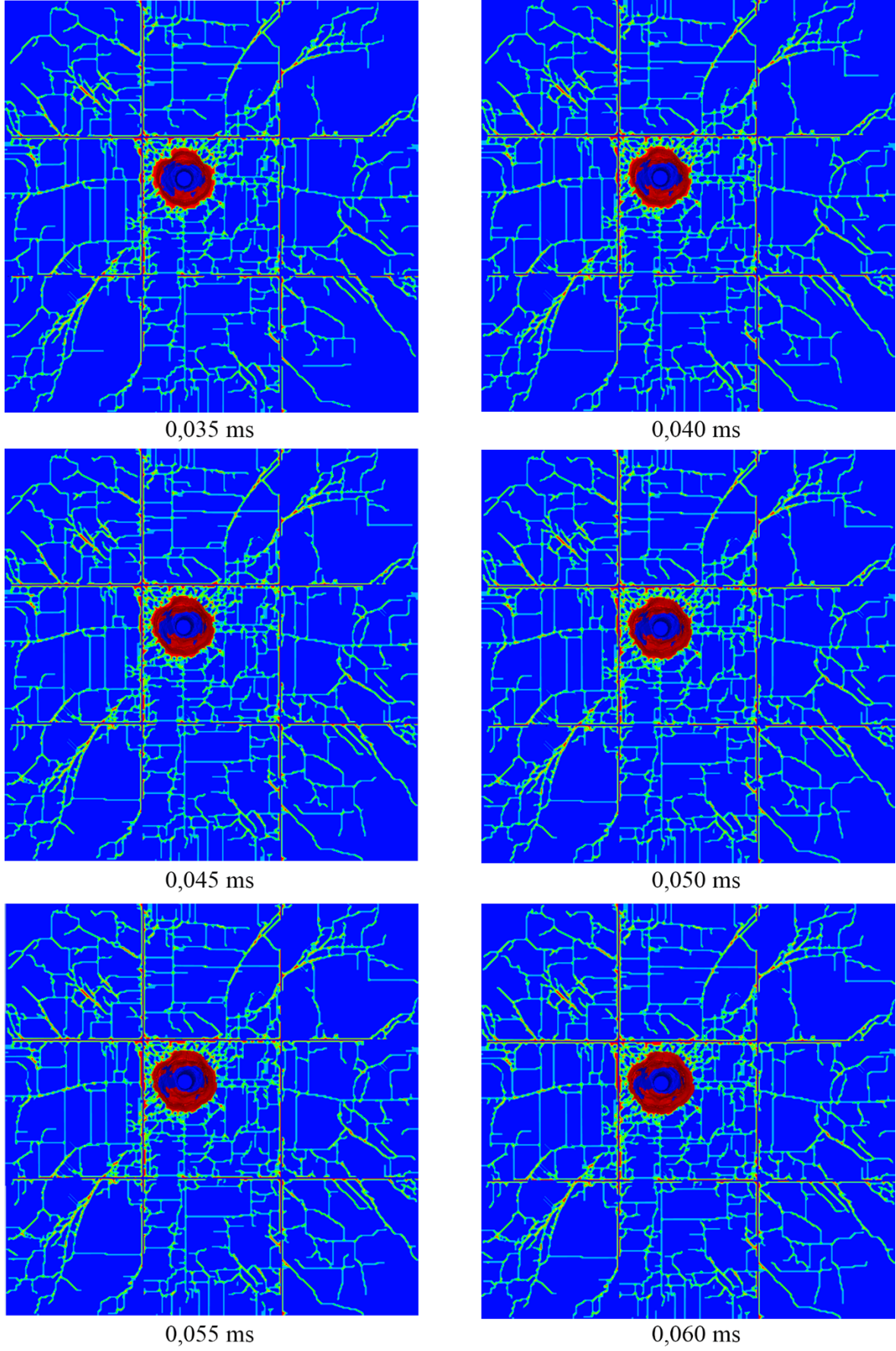
Şekil 4.7. Kırılma konisi oluşumu

Analizler sonucu çarpışma yüzeyinde oluşan deformasyona bakıldığında; çarpışma noktasında oluşan kırılmanın çapı, deneylerde elde edilen sonuçlara yakın bir şekilde, mermi çekirdeği çapının yaklaşık altı katı olarak ölçülmektedir. Şekil 4.6 ve Şekil 4.7’de seramik katmanın ön ve arka yüzeyinde oluşan deformasyonların zamana göre dağılımları gösterilmiştir. Kırmızı ile görünen tam deformasyonlar büyük oranda birinci seramik karonun içerisinde kalmakta, deformasyon diğer seramik karolara kılcal çatlaklar şeklinde ilerlemektedir.

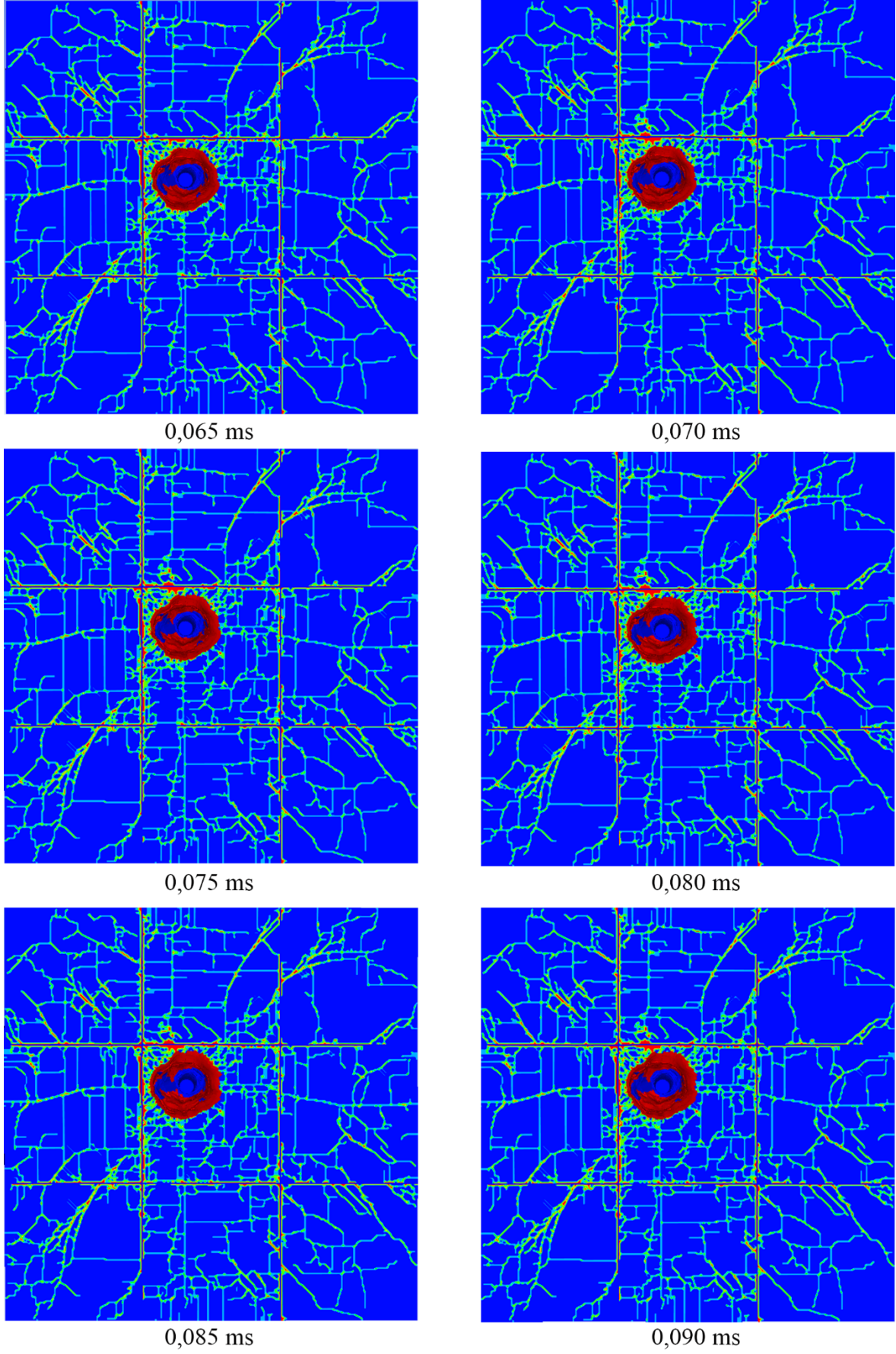
Komşu seramik karolar üzerindeki kılcal çatlaklar dikkate alındığında, aynı deney sonuçlarında görüldüğü gibi, çatlaklar kenarlara yaklaştıkça hasar oranlarının oldukça düştüğü ve etkisizleştiği gözlemlenmektedir. Seramik katmanın, polietilen katman ile arasında kalan arka yüzeyinde oluşan çatlakların tamamına yakını, çarpışma noktasından kenarlara doğru radyal çatlaklar şeklinde oluşmuştur. Ön yüzeyde oluşan radyal çatlakların arasında ise teğetsel çatlak oluşumları gözlemlenmiştir. Deneyisel çalışmada da, bu radyal ve teğetsel çatlaklar birleştiğinde, merkezden kenarlara doğru büyüyen farklı boyutlarda kırıklar oluşmaktadır. Merkeze yakın yerlerde ise küçük parçalar halinde kırılmalar meydana gelmektedir.



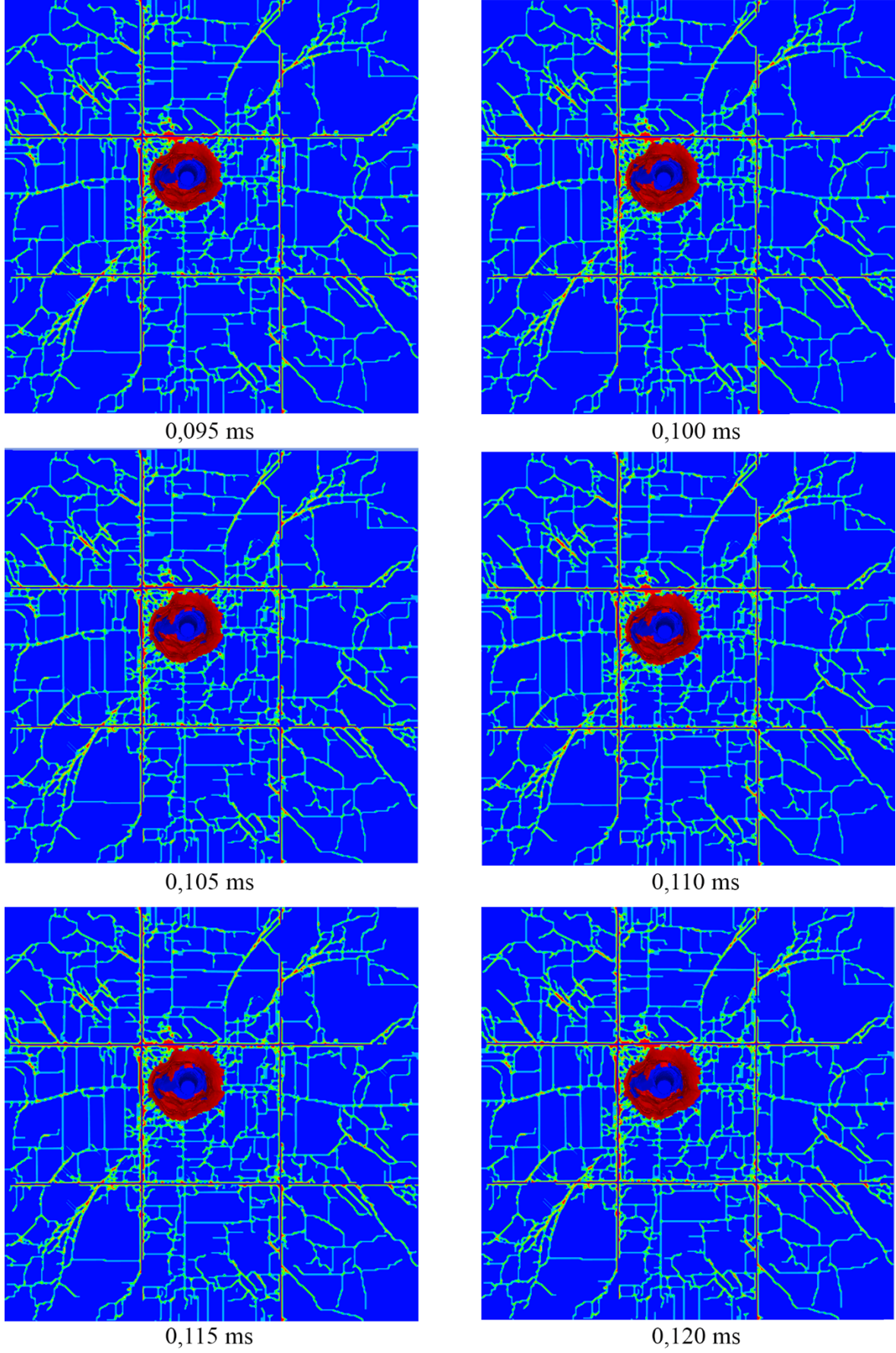
Şekil 4.8. y-z düzleminde seramik katman ön yüzeyinde hasar oluşumu



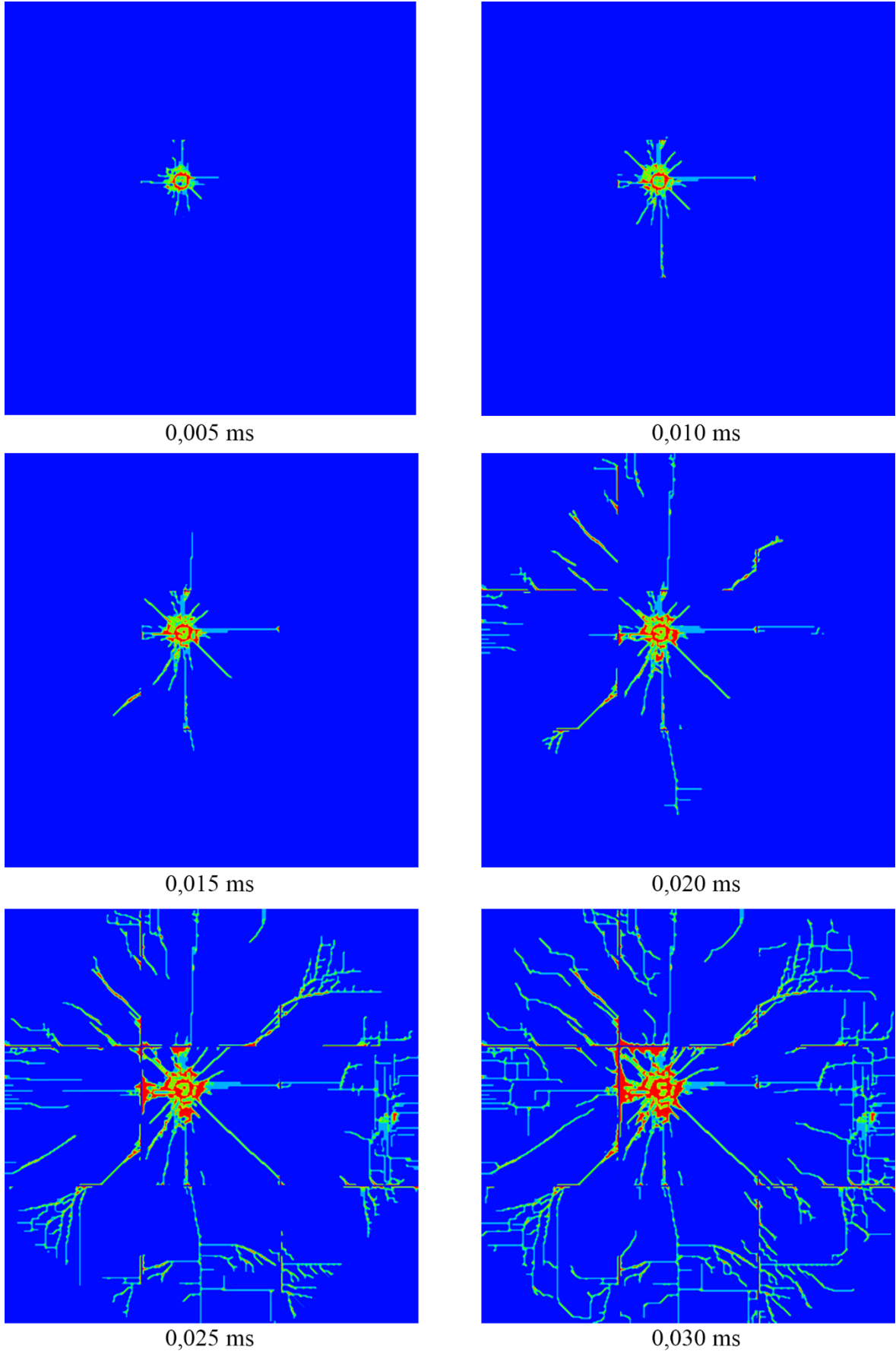
Şekil 4.8. (devam) y-z düzleminde seramik katman ön yüzeyinde hasar oluşumu



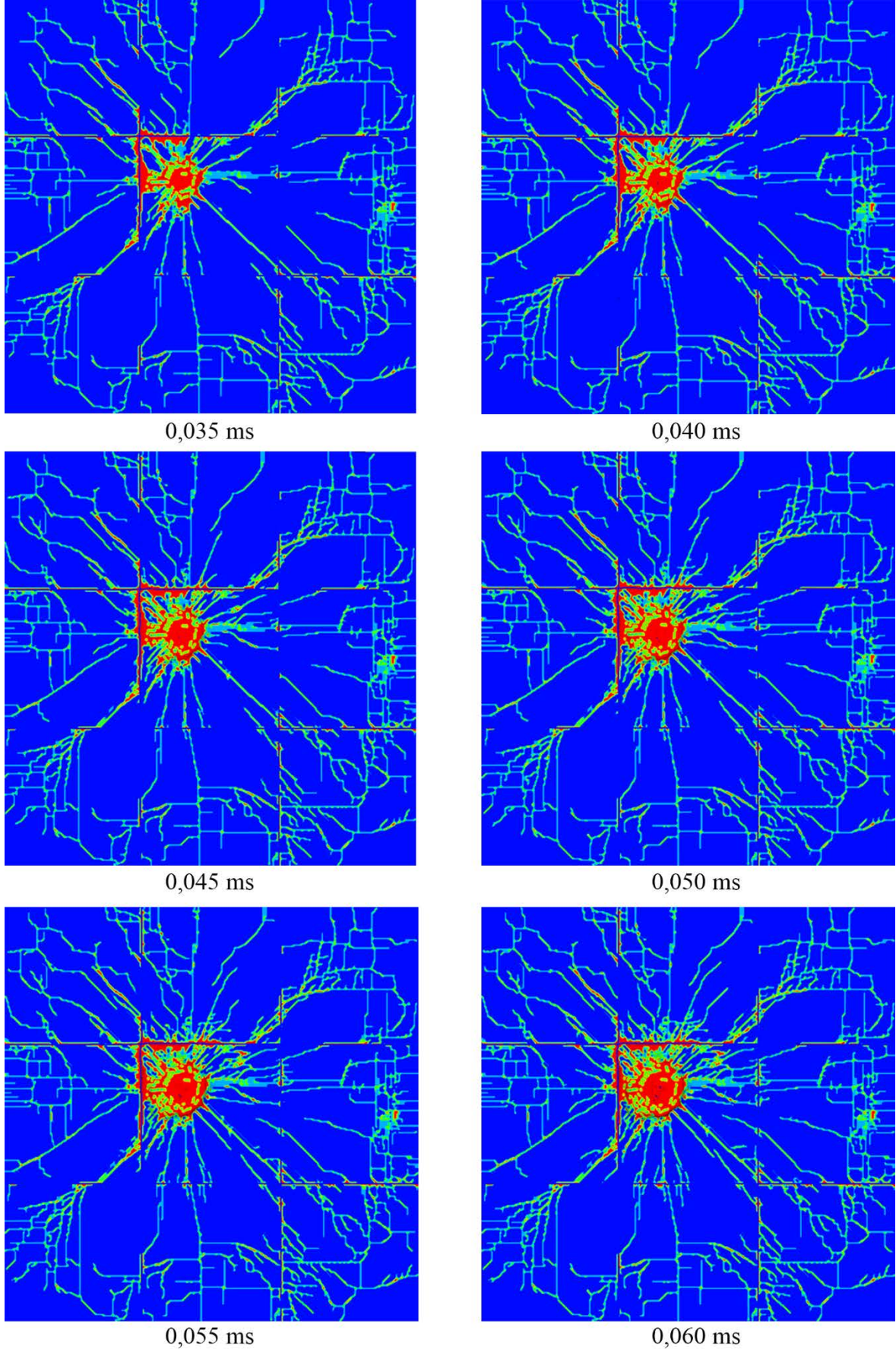
Şekil 4.8. (devam) y-z düzleminde seramik katman ön yüzeyinde hasar oluşumu



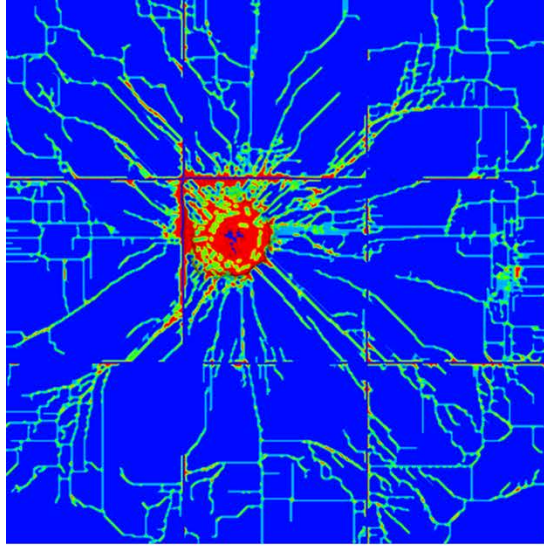
Şekil 4.8. (devam) y-z düzleminde seramik katman ön yüzeyinde hasar oluşumu



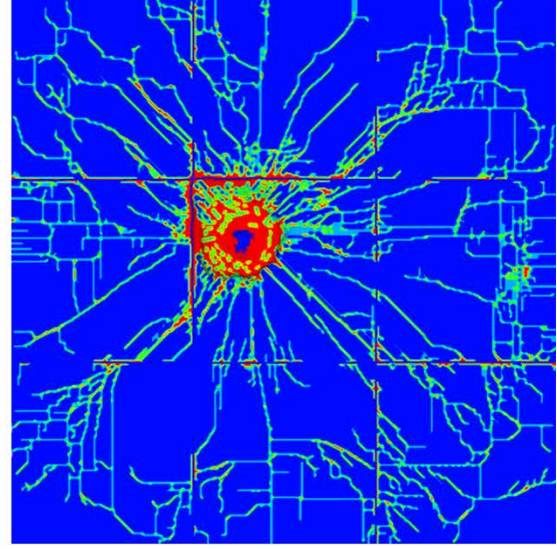
Şekil 4.9. y-z düzleminde seramik katman arka yüzeyinde hasar oluşumu



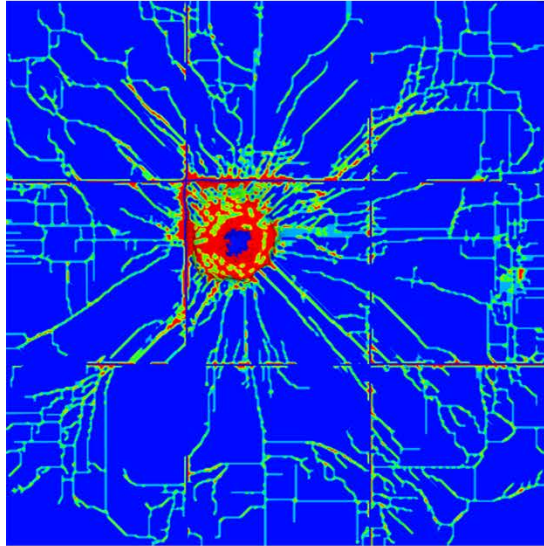
Şekil 4.9. (devam) y-z düzleminde seramik katman arka yüzeyinde hasar oluşumu



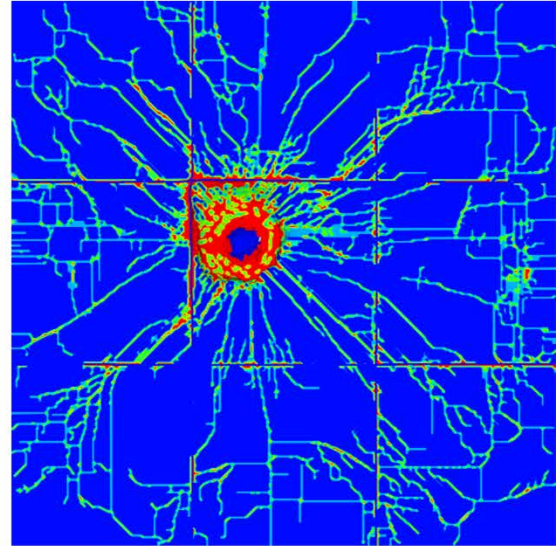
0,065 ms



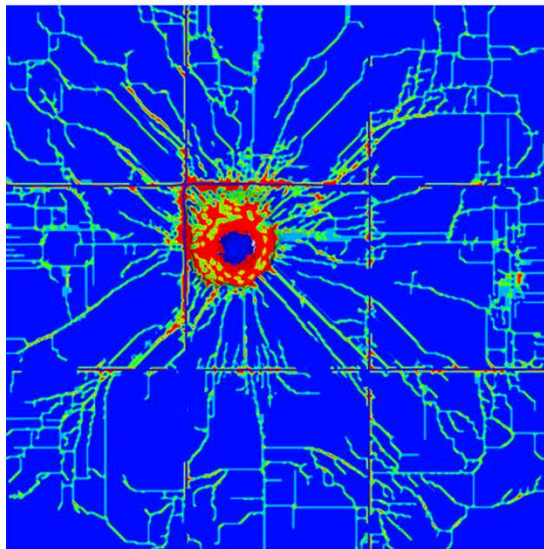
0,070 ms



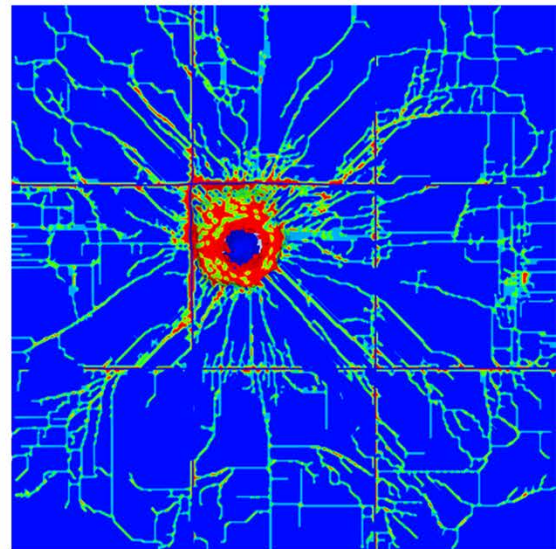
0,075 ms



0,080 ms

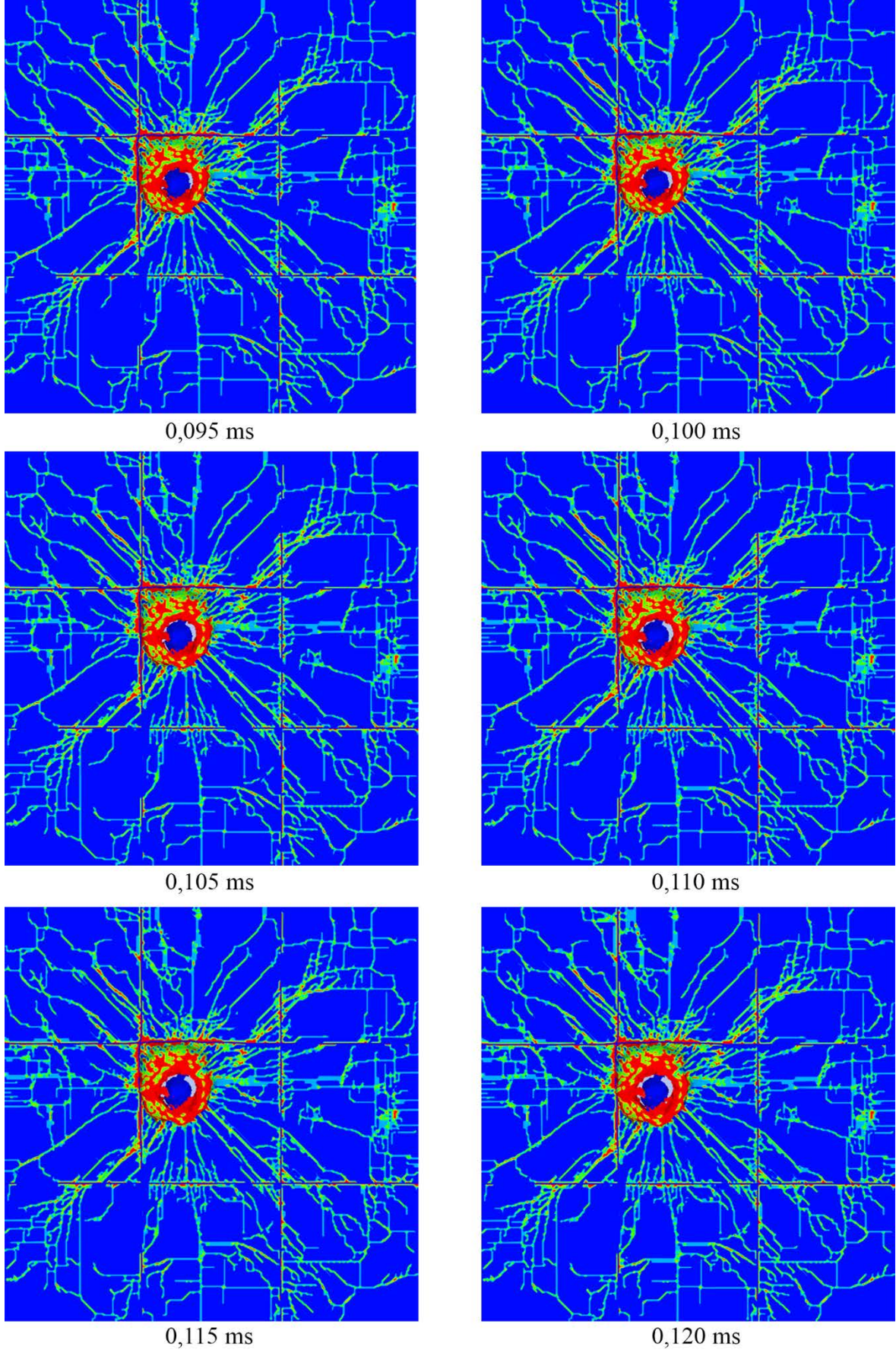


0,085 ms



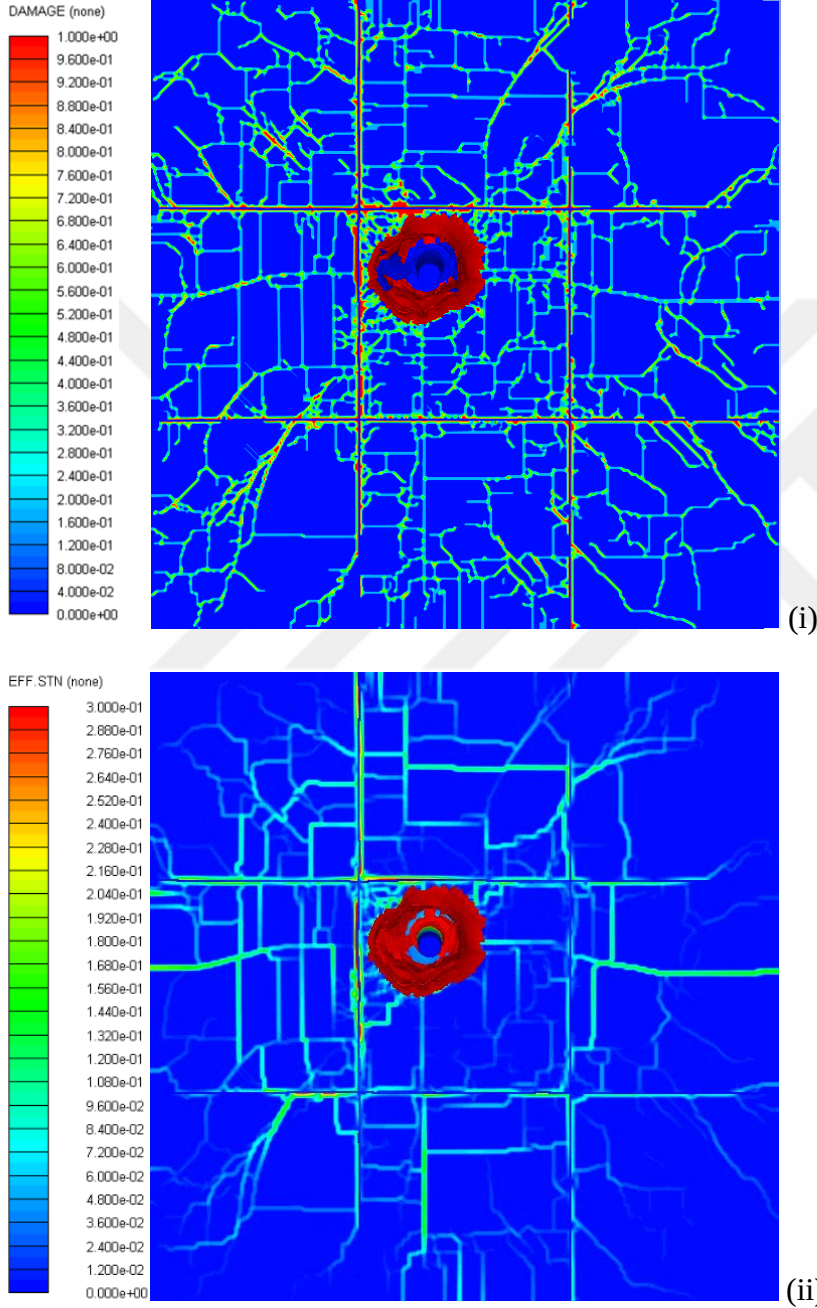
0,090 ms

Şekil 4.9. (devam) y-z düzleminde seramik katman arka yüzeyinde hasar oluşumu



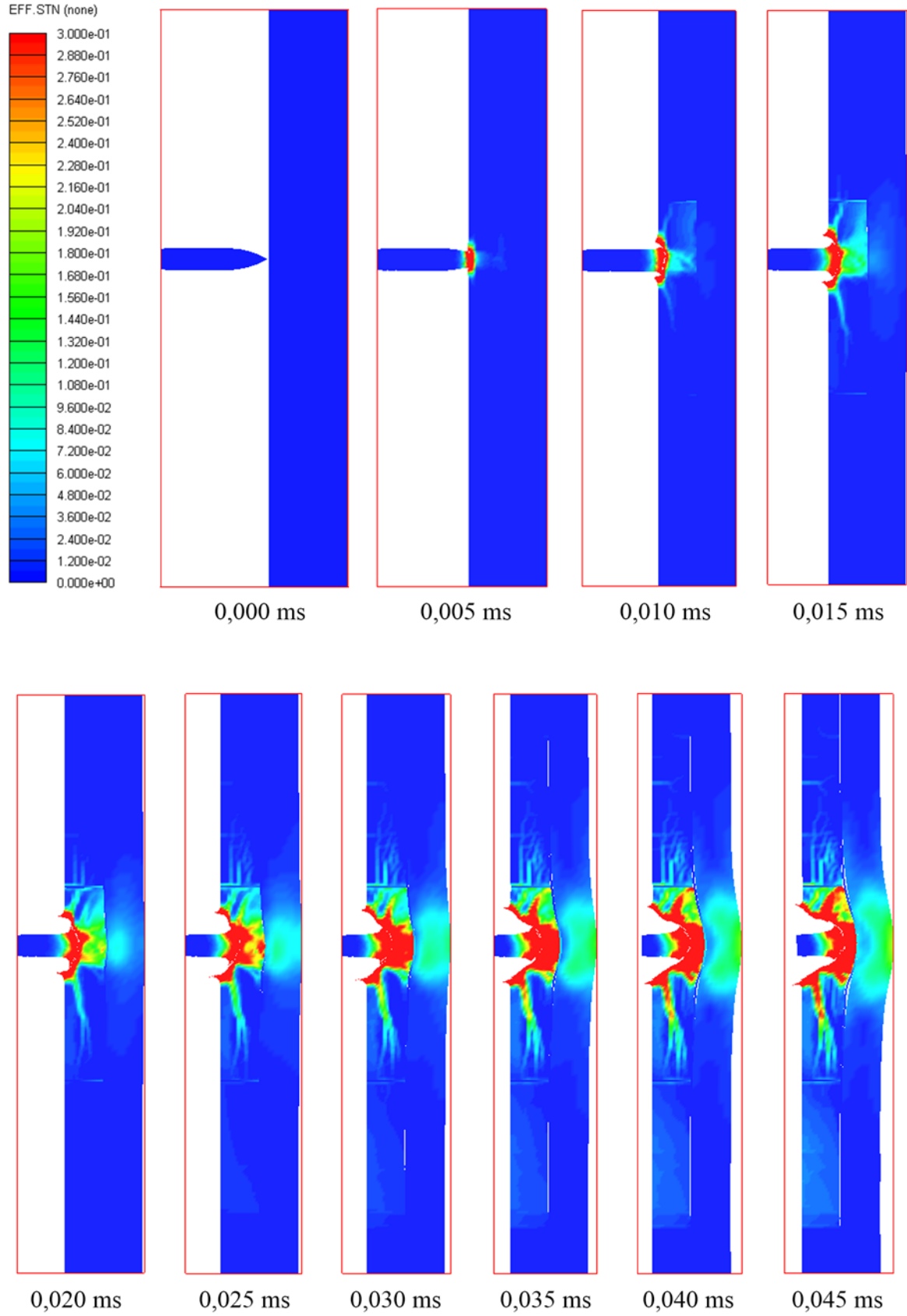
Şekil 4.9. (devam) y-z düzleminde seramik katman arka yüzeyinde hasar oluşumu

Hasar yayılımı bakımından incelediğimiz analiz sonuçlarını bir de seramik üzerinde oluşan gerinimler bakımından incelediğimizde, gerinim dağılımının hasar dağılımıyla aynı olduğu görülmektedir. Şekil 4.10'da hasar ve gerinim dağılımına göre analiz sonuçları gösterilmiştir.

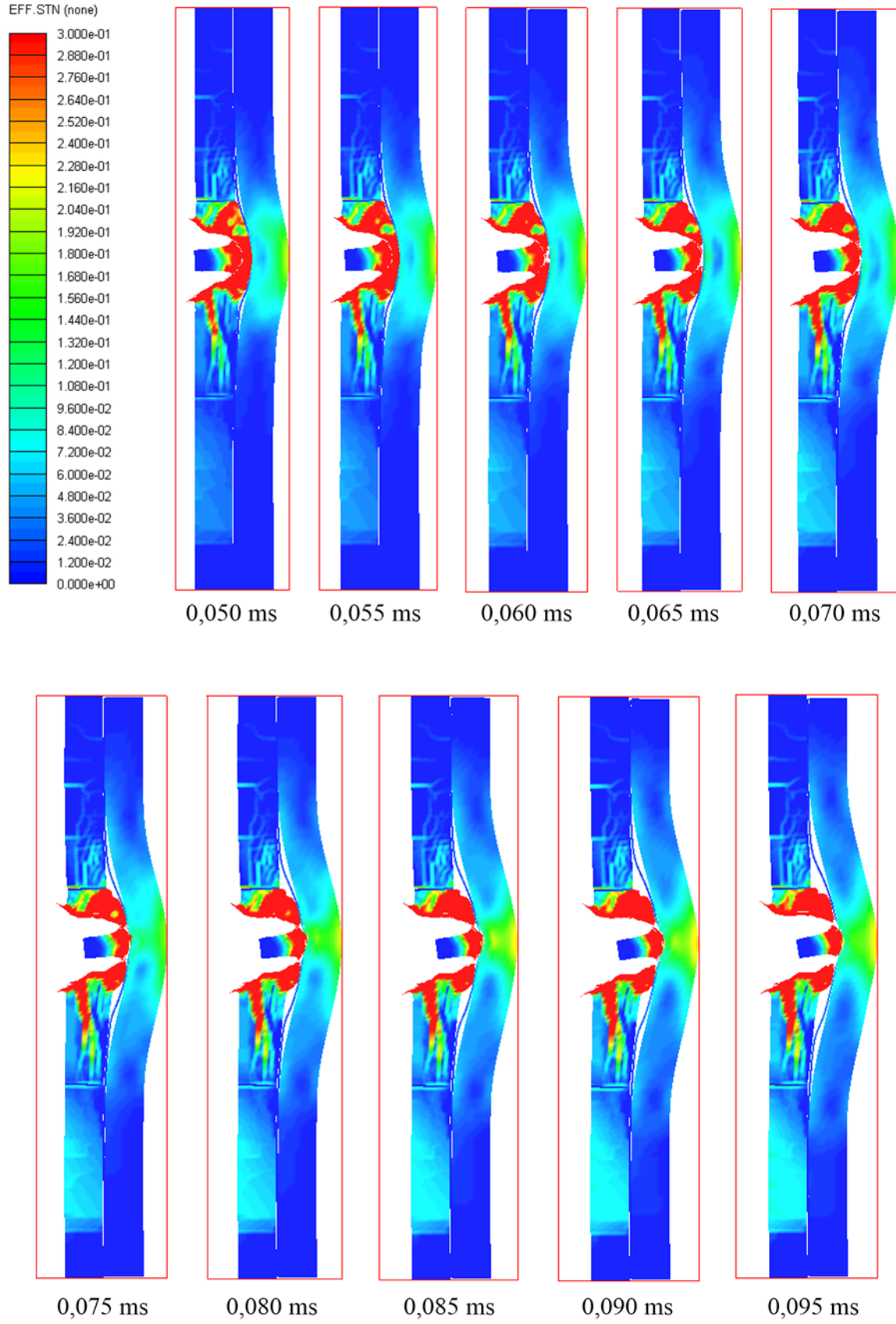


Şekil 4.10. Hasar (i) ve gerinim (ii) analiz sonuçları

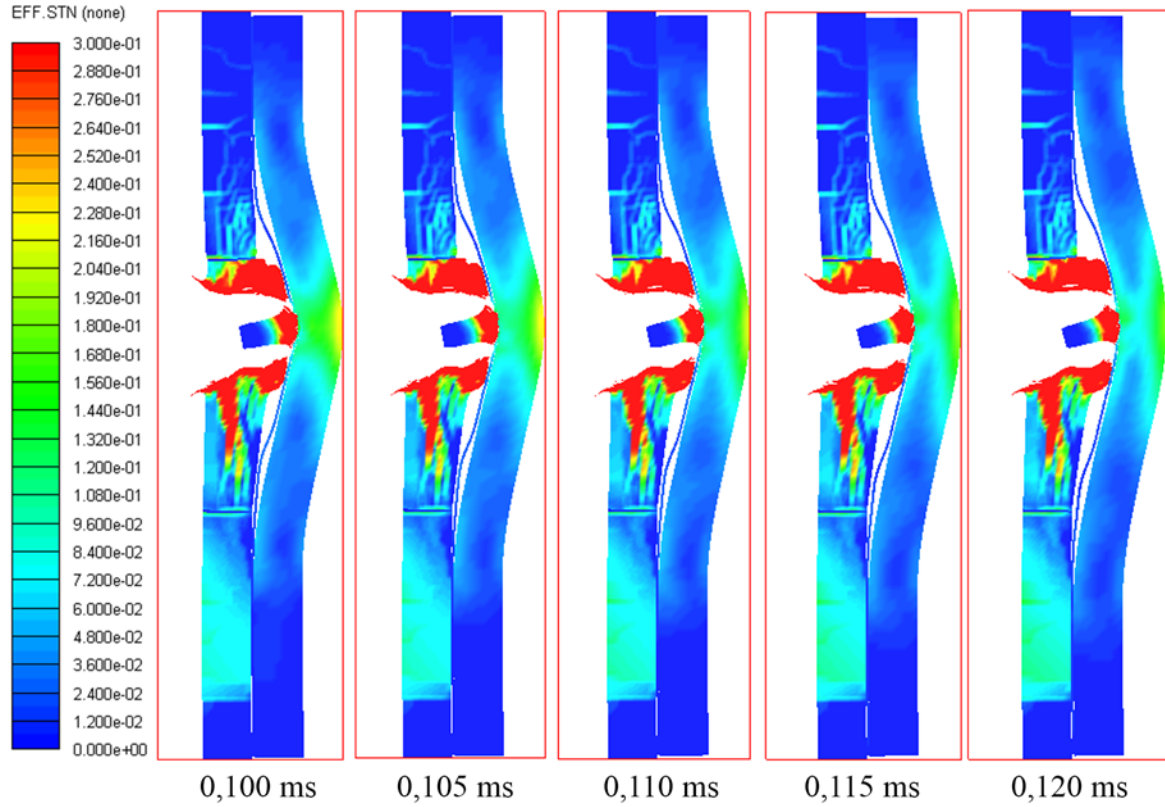
Seramik üzerindeki hasarın oluşan gerilmelerden kaynaklandığı görülmektedir. Gerinim dağılımına ilişkin zamana göre analiz sonuçları ise Şekil 4.11'den Şekil 4.13'e kadar gösterilmiştir.



Şekil 4.11. x-y düzleminde çarpışma noktasının kesitinde gerinim oluşumu



Şekil 4.11. (devam) x-y düzleminde çarpışma noktasının kesitinde gerinim oluşumu

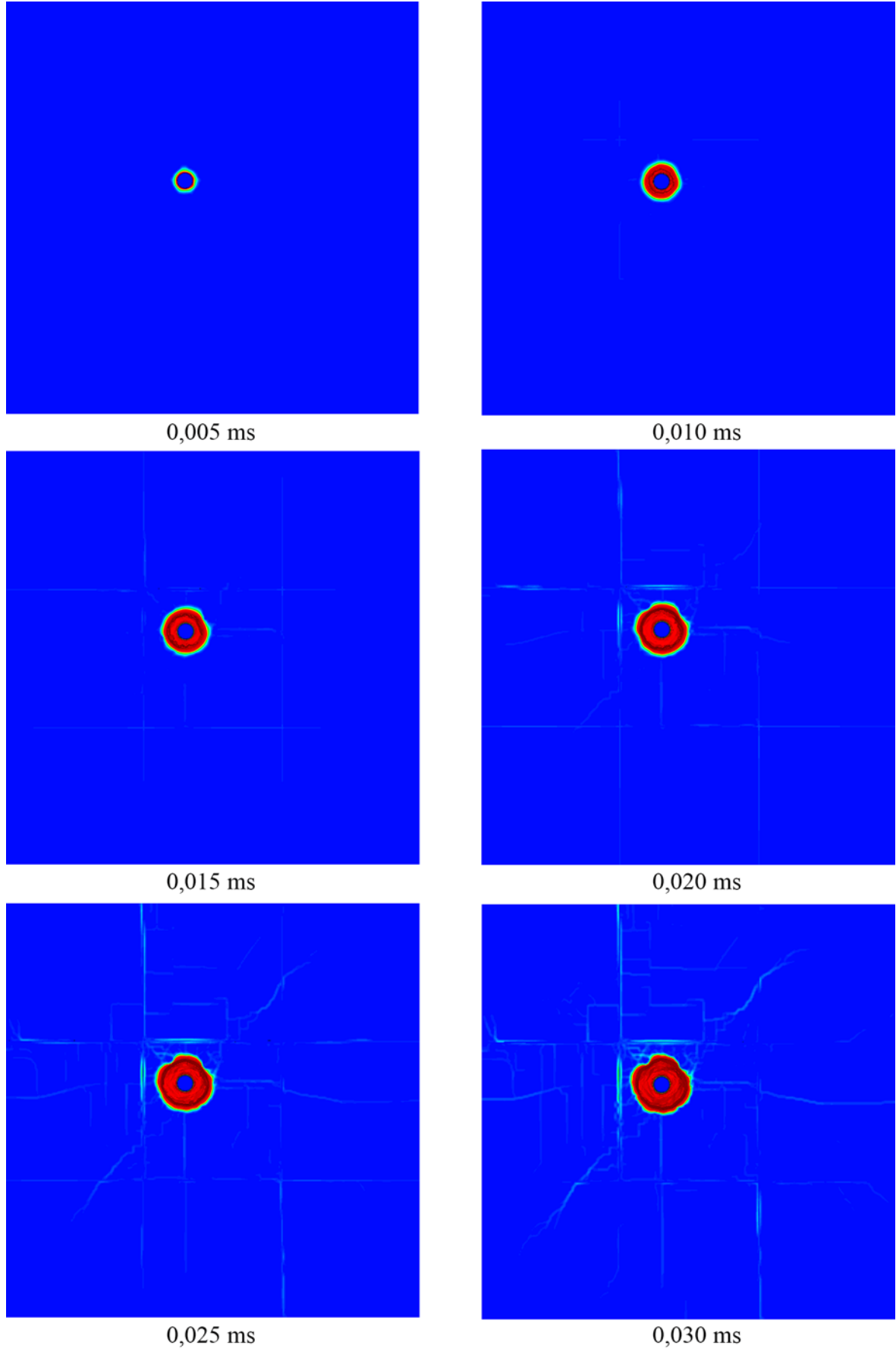


Şekil 4.11. (devam) x-y düzleminde çarpışma noktasının kesitinde gerinim oluşumu

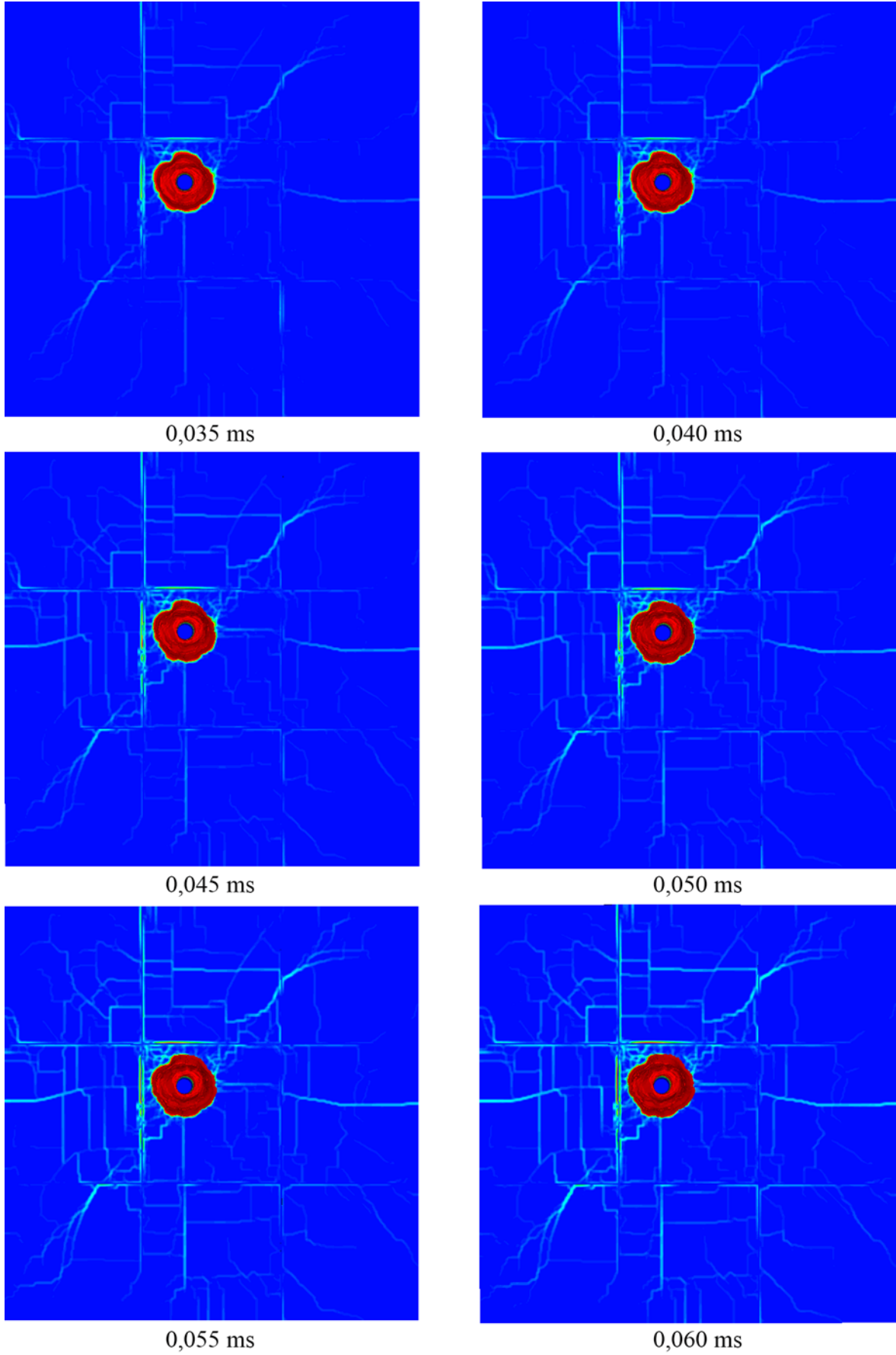
Kesit olarak gerinim dağılımı incelendiğinde, çarpışma anında seramik tabakadaki ve mermi ucundaki gerinim dikkat çekmektedir. Bununla birlikte 0,010'uncu milisaniyede kırılma konisine sebep olan gerinimlerin oluştuğu ve gerinim dağılımının genel olarak hasar dağılımıyla aynı olduğu görülmektedir.

Polietilen tabakada ve mermi modelinde hasar modeli kullanılmadığı için, hasar dağılımı görülememekteydi. Ancak gerinim dağılımında bu malzemeler üzerindeki değişim açıkça görülmektedir. Polietilen tabaka üzerinde gerinimin, merkezden kenarlara doğru dalgalar şeklinde artıp azaldığı, en yüksek gerinim değerlerinin arka yüzeyindeki çukurlaşmanın tepe noktasında olduğu görülmektedir. Polietilen kompozit tabakadaki ilk deformasyon arka yüzeydeki çekme gerilmesi nedeniyle, fiber kopması ve delaminasyonlar şeklinde gerçekleşmektedir.

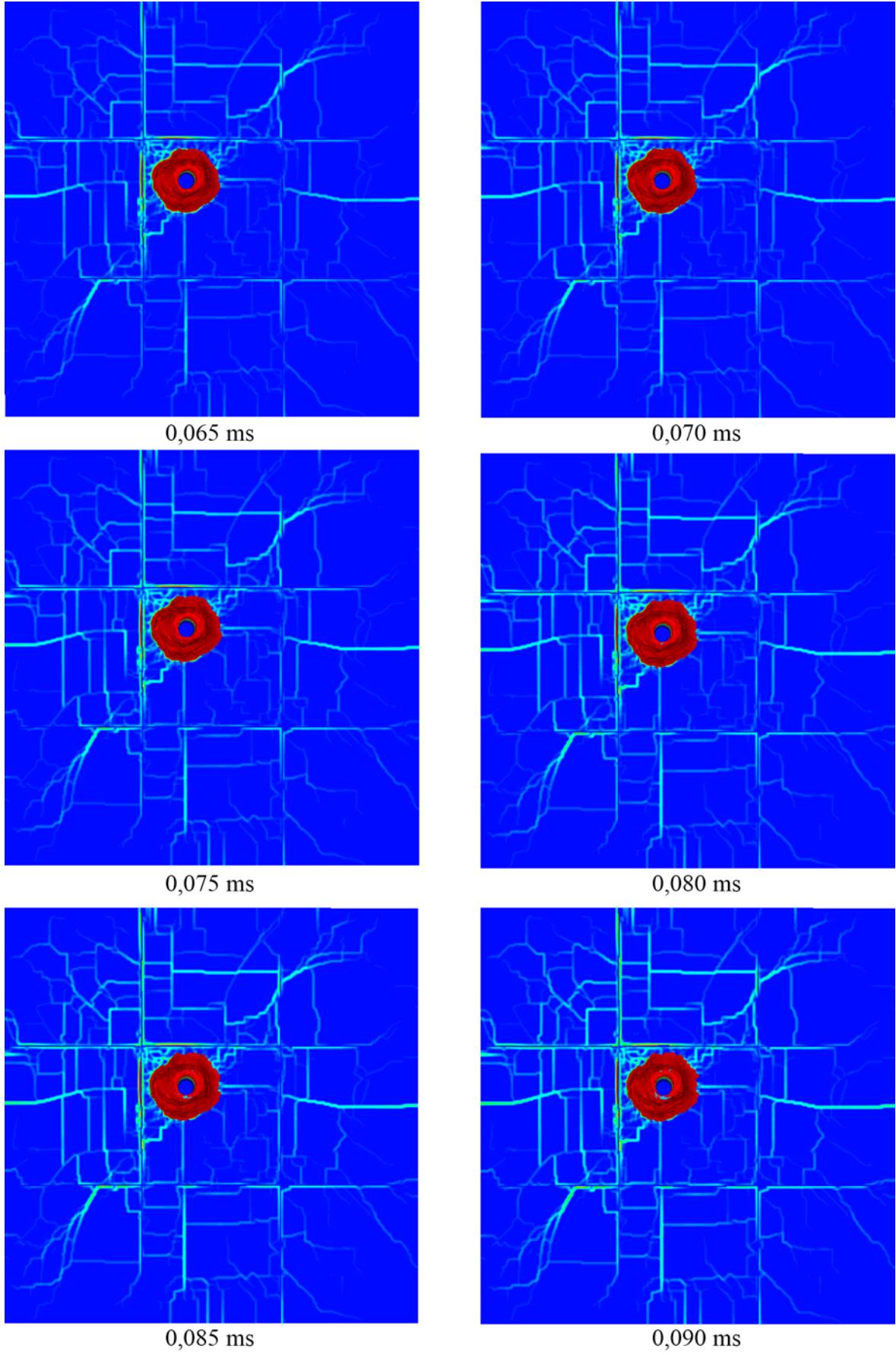
Seramik katman ön yüzeyinde y-z düzleminde oluşan gerilme dağılımları Şekil 4.12'de, arka yüzeyde oluşan gerilme dağılımları Şekil 4.13'te görülmektedir.



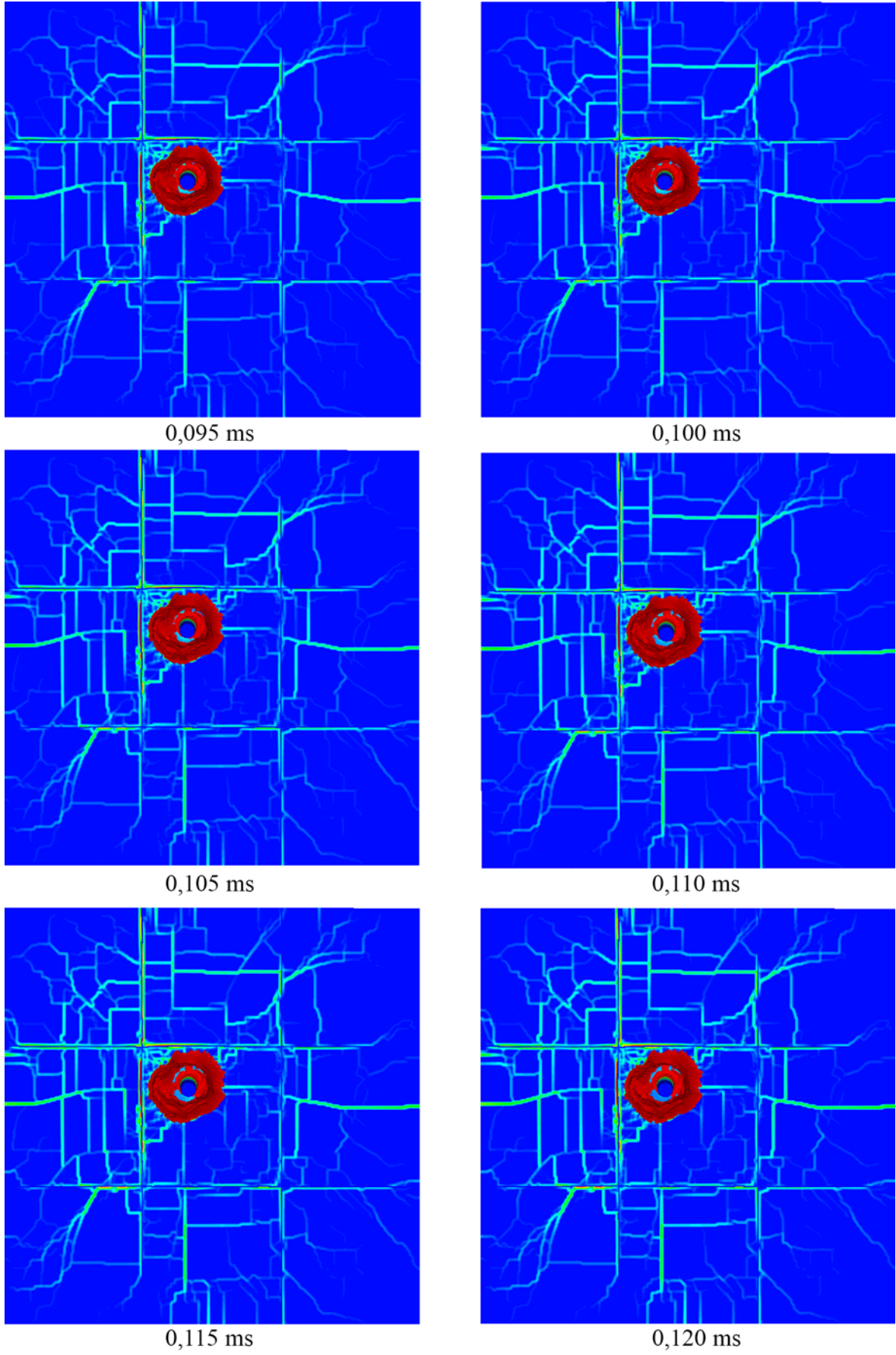
Şekil 4.12. y-z düzleminde seramik katman ön yüzeyinde gerinim dağılımı



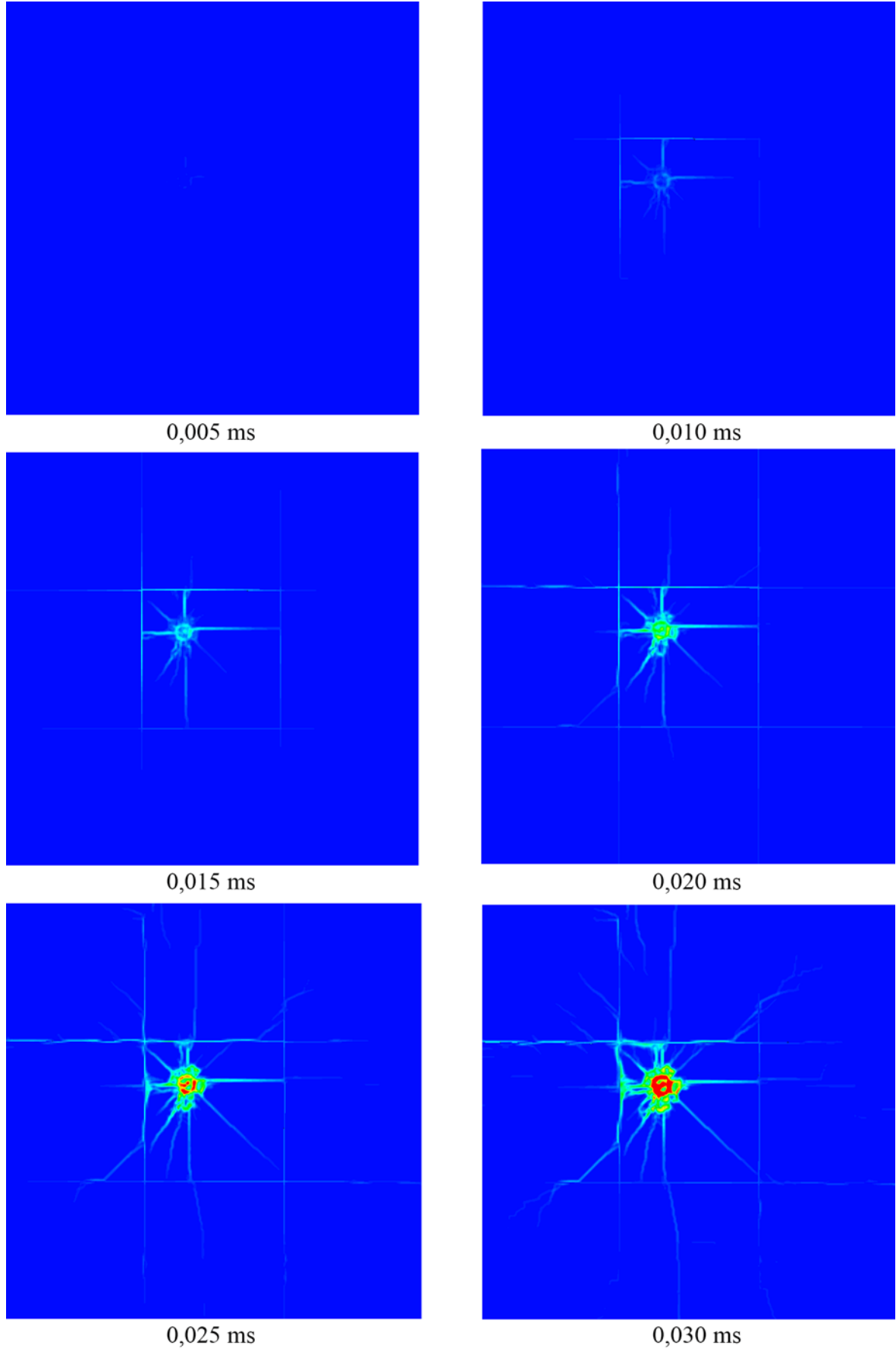
Şekil 4.12. (devam) y-z düzleminde seramik katman ön yüzeyinde gerinim dağılımı



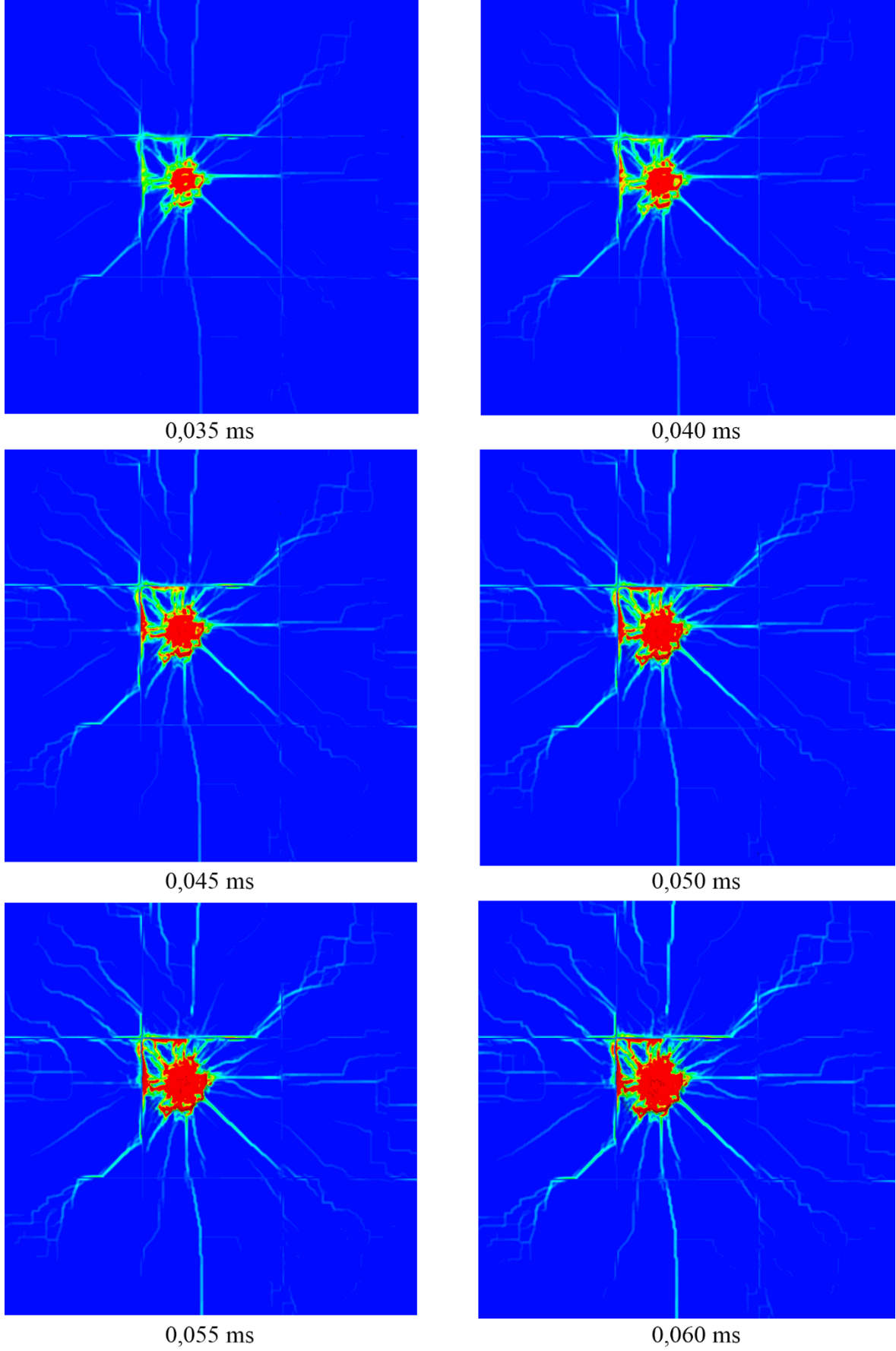
Şekil 4.12. (devam) y-z düzleminde seramik katman ön yüzeyinde gerinim dağılımı



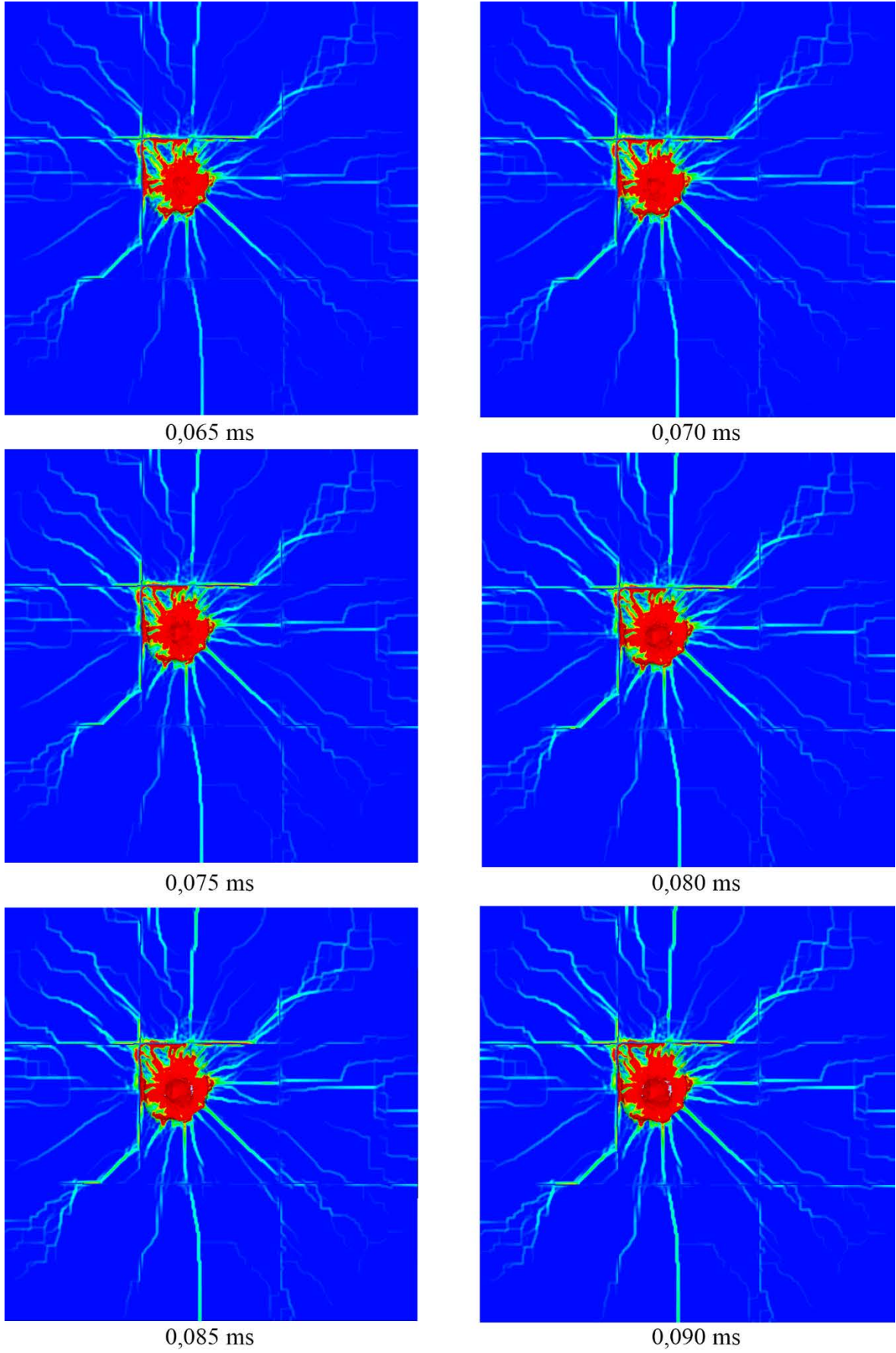
Şekil 4.12. (devam) y-z düzleminde seramik katman ön yüzeyinde gerinim dağılımı



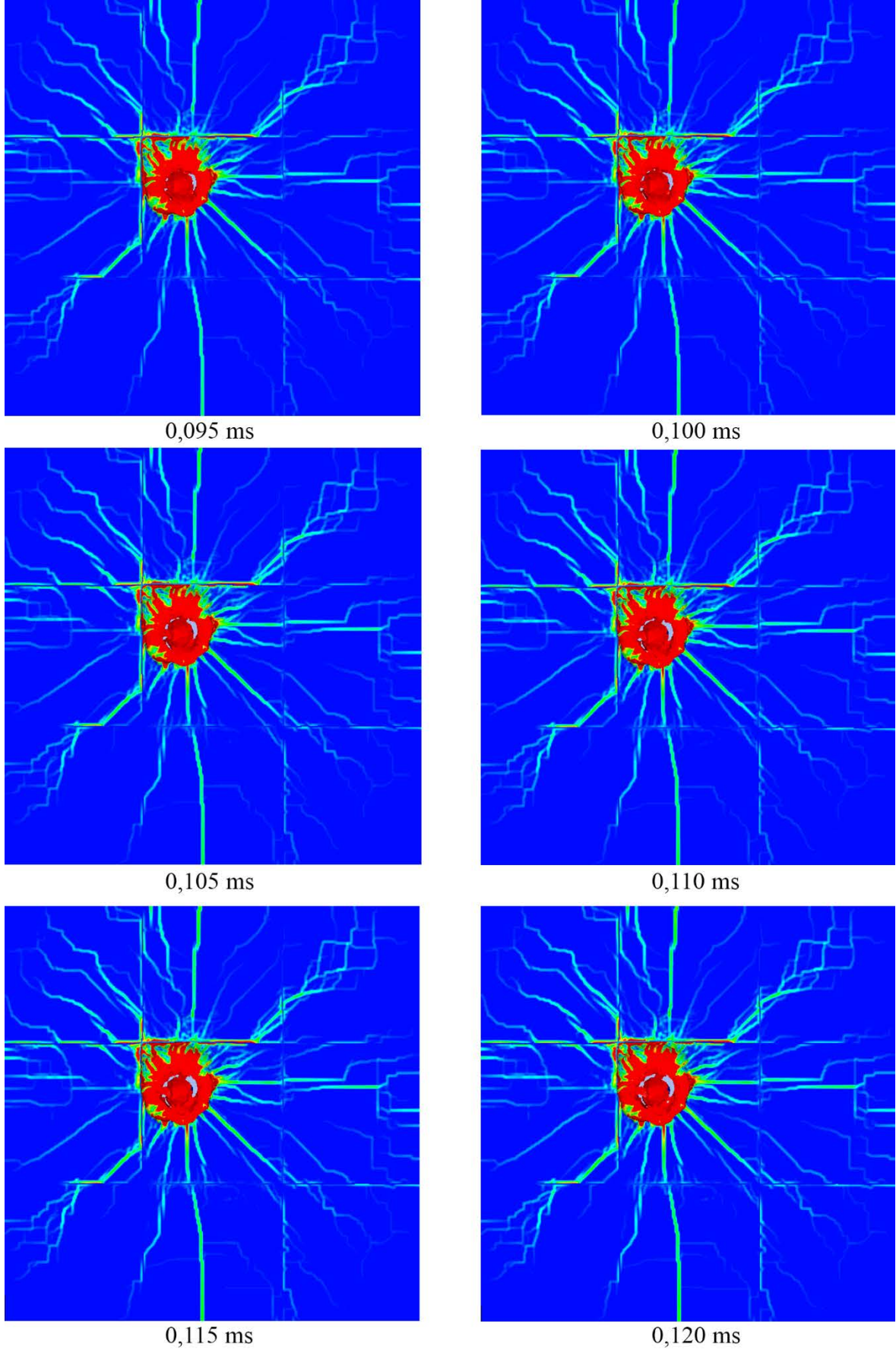
Şekil 4.13. y-z düzleminde seramik katman arka yüzeyinde gerinim dağılımı



Şekil 4.13. (devam) y-z düzleminde seramik katman arka yüzeyinde gerinim dağılımı

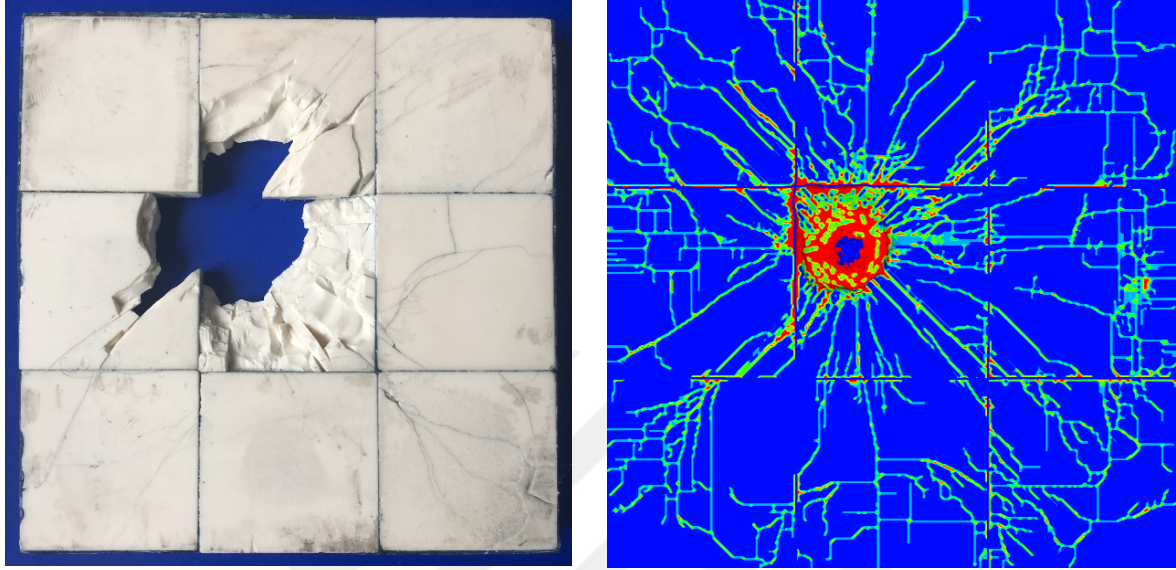


Şekil 4.13. (devam) y-z düzleminde seramik katman arka yüzeyinde gerinim dağılımı



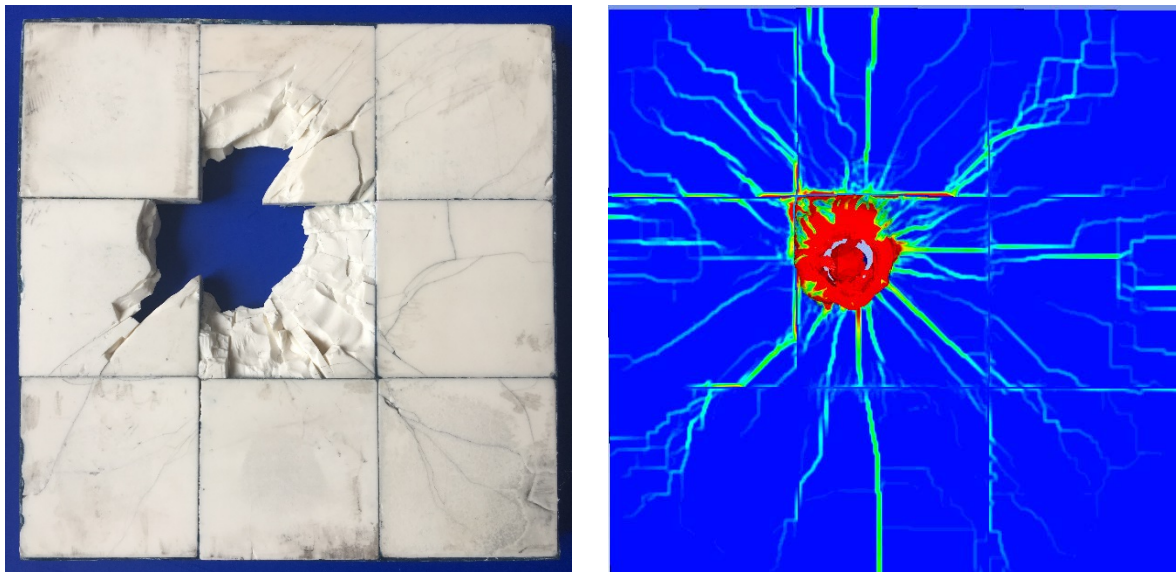
Şekil 4.13. (devam) y-z düzleminde seramik katman arka yüzeyinde gerinim dağılımı

Deneyler sonucu deforme olan seramik arka yüzeyi, Şekil 4.14'te analizler sonucu seramik arka yüzeyinde oluşan hasar dağılımı ile birlikte, Şekil 4.15'te ise gerinim dağılımı ile birlikte görülmektedir.



Şekil 4.14. Deney numunesi ile analiz sonuçlarındaki hasar dağılımları

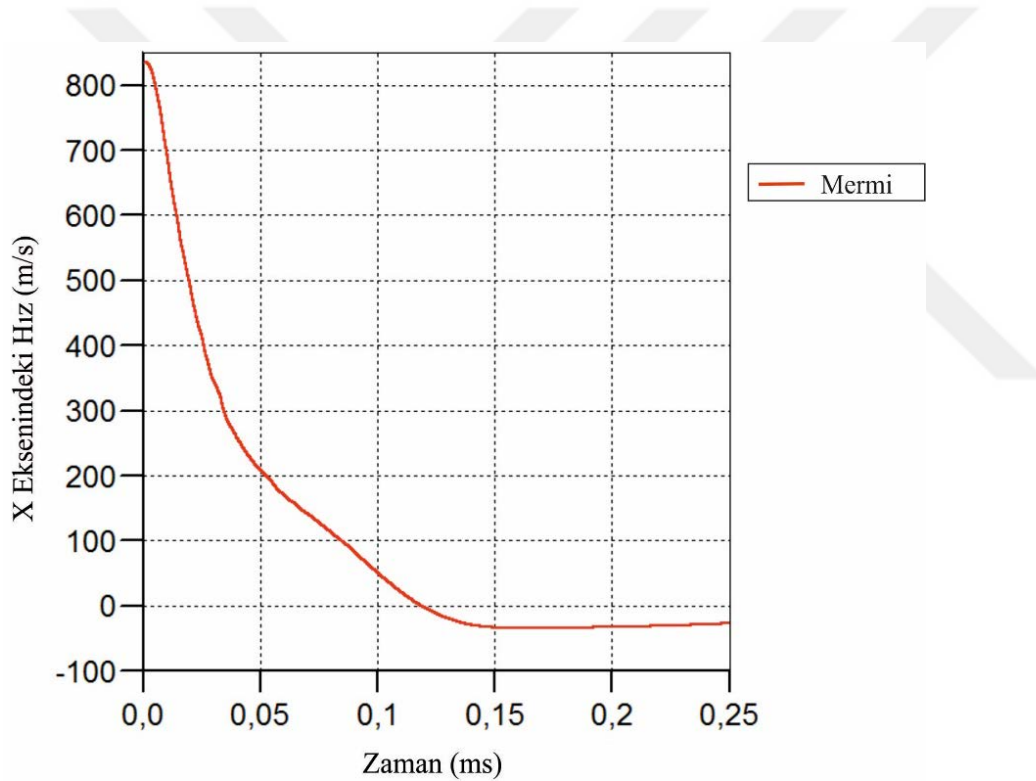
Analiz sonuçları incelendiğinde, kırılma ve çatlak ilerleyişinin deneysel çalışmalar ile birbirlerine yakınlığı görülmektedir. Çatlak ilerleyişinin doğrultu ve büyüklükleri, epoksi tabaka üzerindeki davranışı, kenarlara yaklaştıkça etkisini kaybetmesi bakımından birbirlerine oldukça benzemektedirler.



Şekil 4.15. Deney numunesi ile analiz sonuçlarındaki gerinim dağılımları

Analiz sonuçlarının sayısal değerleri incelendiğinde ve grafiğe döküldüğünde; merminin hızının ise 0,118'inci milisaniyede sıfırlandığı görülmektedir. Bu da göstermektedir ki oluşturulan zırh sistemi, 835 mm/ms hızla gelen bir mermiyi milisaniyenin onda biri gibi bir sürede ve 20 mm gibi bir mesafede tamamen durdurabilmektedir. Şekil 4.16'da merminin pozitif x eksenindeki hızının zamana göre değişim grafiği görülmektedir.

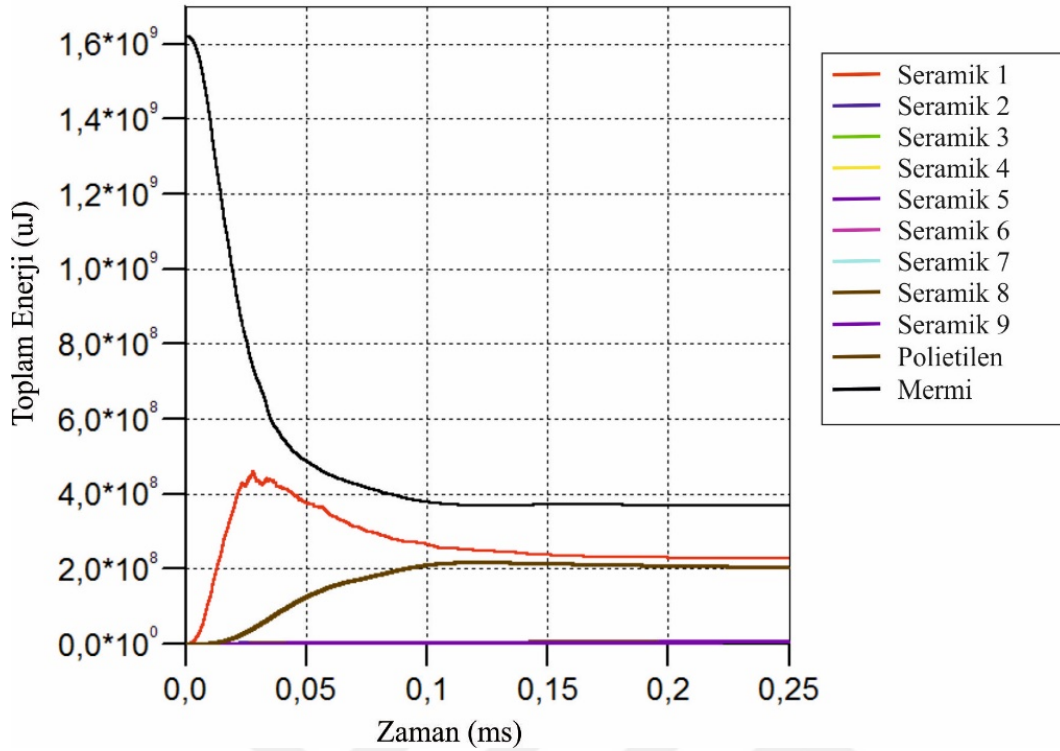
Grafikte ayrıca, yaklaşık olarak 0 – 0,035 milisaniye aralığında hız eğrisinin eğiminin çok yüksek olduğu görülmektedir. Bu da gösteriyor ki, seramik katman içerisinde konik kırılmanın olduğu süre zarfında merminin hızı bir hayli azalmakta, yani mermi kinetik enerjisinin büyük kısmını bu sırada kaybetmektedir.



Şekil 4.16. Merminin x eksenindeki hızının zamana göre değişimi

Merminin çekirdeğinin kütlesi 4,77 gram olduğundan, başlangıçtaki kinetik enerjisi yaklaşık 1 660 Joule olarak hesaplanmaktadır. Şekil 4.17'de zırh sistemdeki parçaların ve merminin zamana göre enerji değişim grafiği görülmektedir.

Grafik incelendiğinde merminin kinetik enerjisinin büyük bir kısmının 1 numaralı seramik tarafından çarpışma sırasında emildiği, geri kalan enerjinin büyük miktarının ise arkadaki sünek destek tabakası yani polietilen katman tarafından sönmüldüğü görülmektedir.



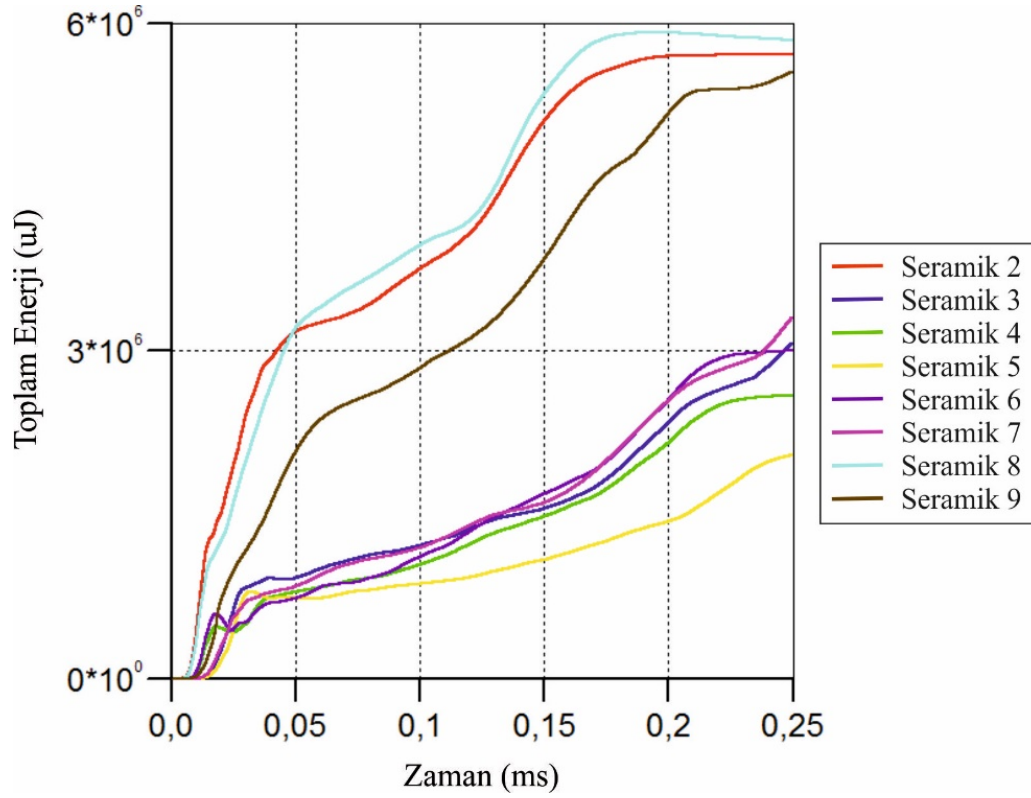
Şekil 4.17. Sistemdeki tüm elemanların toplam enerji değişimleri

Çarpışmanın 0,035'inci saniyesine kadar mermi enerjisindeki büyük düşüşle birlikte, çarpışmanın olduğu 1 numaralı merkez seramik enerjisinde aynı şekilde bir artış söz konusudur. Bu süre zarfında seramik içerisinde konik kırılma meydana gelmekte ve merminin ön bölgesinde yer alan seramik katman, kalınlık boyunca tamamen parçalanmaktadır. Bu süre zarfında mermi, toplam enerjisinin yaklaşık olarak yüzde 70'lik kısmını kaybetmektedir. Bu da kompozit zırh sisteminin önyüzeyinde seramik bir katman bulunmasının ne kadar etkili olduğunu göstermektedir. 0,035'inci milisaniyeden itibaren ufalanan seramik parçaları ve mermi sünek arka destek tabakasında deformasyona neden olmaya başladığından, grafikte görüleceği gibi polietilen destek tabakasının enerjisi artmaya başlamaktadır.

2'den 9'a kadar numaralandırılan çevre seramiklerdeki enerji değişimlerinin, merkez seramik ve polietilen katmandaki değişime göre yok denecek kadar az olduğu görülmektedir. Bu seramik karolardaki enerji değişimini daha net görebilmek için seramik karoların kendi aralarındaki enerji değişim grafiği Şekil 4.18'de gösterilmiştir.

Şekil 4.18'de yer alan grafikten görüleceği gibi merminin çarptığı seramiğe komşu olan seramiklerdeki enerji değişimlerinin $2 \cdot 10^6 \mu J$ ile $6 \cdot 10^6 \mu J$ arasında olduğu görülmektedir.

Oysa ki Şekil 4.17’de 1 numaralı seramikteki maksimum enerji değişiminin $4 \cdot 10^8 \mu J$ seviyelerinde olduğu görülmektedir. Bu da çarpışmanın olduğu seramikteki enerji değişiminin, çevre seramiklerdeki değişime oranla 100 kat daha fazla olduğunu göstermektedir.



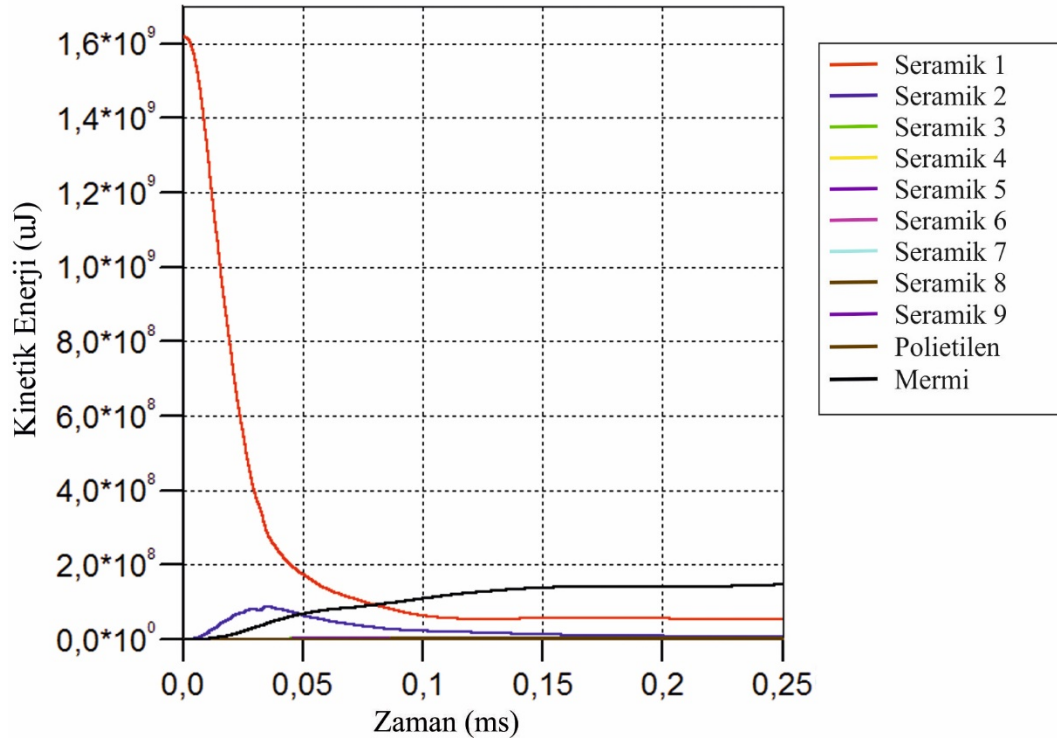
Şekil 4.18. Çevre seramiklerin enerji değişimleri

Mermi, merkezde bulunan 1 numaralı seramiğin sol üst köşesine doğru isabet ettiğinden deformasyon çevre seramik karolara eşit dağılmamaktadır. Şekil 4.18’deki grafikte de görüleceği gibi çarpışmaya daha yakın olan 2, 8 ve 9 numaralı seramiklerdeki enerji değişiminin diğer çevre seramik karolara göre daha fazla olduğu görülmektedir.

Şekil 4.19’da görülen sistemdeki elemanların kinetik enerjilerinin zamana göre değişim grafiği incelendiğinde, Şekil 4.17’deki toplam enerji değişim grafiğine benzer bir değişim görülmektedir. Yine 1 nolu seramik, mermi ve polietilen destek tabakasının kinetik enerji değişimlerinin, sistemdeki diğer elemanların kinetik enerji değişimlerinden çok daha fazla oldukları görülmektedir.

Merminin toplam enerjisinin yüzde 70 azaldığı, yani sermik katmanın konik kırılarak ve merminin uç kısmının parçalanarak yoğun deformasyona uğradıkları 0,035 milisaniyelik

süre zarfında, mermi kinetik enerjisinin yaklaşık olarak yüzde 85-87 civarında azaldığı görülmektedir. Bu da, bu süre zarfında merminin etkisini çok büyük oranda kaybettiğini ancak iç enerjilerindeki değişimin ve deformasyonun devam ettiğini göstermektedir.



Şekil 4.19. Sistemdeki tüm elemanların kinetik enerji değişimi

Ayrıca grafiklerde mermi hızının sıfırlandığı andan itibaren enerji değişimlerinin devam ettiği görülmektedir. Mermi yaklaşık 0,18'inci milisaniyede pozitif x eksen yönündeki hareketini kaybetmesine karşın, sistem stabil hale gelmemekte; mermi bir süre daha negatif yönde hareket etmektedir. Buna merminin geri sekmesi ve sünek polietilen katmanının elastik geri şekil kazanma eğilimiyle halen temas halinde olduğu mermiyi itmesi sebep olmaktadır.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez kapsamında alümina (Al_2O_3) seramik önyüzlü ultra yüksek molekül ağırlıklı polietilen (UHMWPE) destek tabakalı kompozit bir zırh sisteminin 7.62 x51 (AP) zırh delici mermisine karşı balistik testleri yapılmış, meydana gelen hasar yapıları incelenmiştir. Ayrıca deneyleri yapılan zırh sistemi ve merminin yüksek hızlı darbe sonucu oluşan davranışları Autodyn programı yardımıyla modellenmiş, analiz sonuçları gerçekleştirilen deneysel çalışmalarla karşılaştırılmış ve yorumlanmıştır.

Yurt dışından temin edilen alümina (Al_2O_3) seramiklerin epoksi reçine ile birbirlerine ve polietilen tabakaya yapıştırılması, fırınlanması ve balistik testleri Nurol Teknoloji Sanayi ve Madencilik A.Ş. laboratuvarları bünyesinde gerçekleştirilmiştir.

10 mm kalınlığında, 50x50 mm yüzey alanına sahip kare prizma şeklinde olan seramik karolar 3x3'lük düzende dizilmiş ve yaklaşık 835 m/s hıza sahip mermi merkezde kalan seramik karoya isabet ettirilmiştir. Sonlu elemanlar modeli oluşturulan sistemin analizleri de bu doğrultuda gerçekleştirilmiştir.

Test sonuçları dikkate alındığında alumina önyüzlü kompozit zırh sisteminin balistik darbeye karşı bütünlüğünü koruduğu ve NIJ ve STANAG standartları çerçevesinde başarılı bir koruma sağladığı görülmüştür. Meydana gelen hasar alanının büyük bölümünün darbeye maruz kalan seramik içerisinde olduğu ve 50 mm çapında bir alan içerisinde kaldığı tespit edilmiştir. Ayrıca destek tabakası olarak kullanılan polietilen kompozitte oluşan göçük miktarının 20-25 mm aralığında olduğu, bu değerlerin de standartlarda istenilen maksimum 44 mm değerinin birhayli altında olduğu görülmüştür.

Ayrıca seramik ön yüzey üzerine bir kat e-cam kumaş yerleştirilmesinin seramiklerin ve kopan büyük parçaların bir arada tutulmasına etken olduğu görülmüştür. Çarpışma sonucu merminin bakır ceket ve kurşun dolgu kısımlarının tamamen sıyrıldığı, çelik çekirdeğin ise ucunun kırılıp körleşerek büyük bir deformasyona uğradığı görülmüştür.

Bu bağlamda, 10 milimetre kalınlığındaki alümina seramiğin yüksek hızda darbe altındaki performansının ve kırılma tokluğunun, belirlenen zırh kombinasyonu ile birlikte yeteri kadar

yüksek olduğuna; ayrıca çelik zırh sistemlerine göre çok daha hafif olan ve silisyum karbür, bor karbür gibi diğer balistik seramiklere göre çok daha ucuz olan alümina seramiklerin balistik koruma için uygun bir seçim olacağı görülmüştür.

Deneysel sonuçların modellenmesi yapılırken, katı model tasarımı için Autodesk Inventor, sayısal model içinse Ansys programları tercih edilmiştir. Explicit çözümler için de, Ansys programının Autodyn modülü kullanılarak analizler gerçekleştirilmiştir. Sayısal analizler sırasında gerçekleştirilen katı model ve sonlu elemanlar modellerini, gerçekleştirilen deneylere en yakın olacak şekilde ayarlamaya çalışılmıştır. Çizelge 3.1 – Çizelge 3.4'te yer alan malzeme modellerindeki girdiler; Çizelge 4.1'de yer alan bağlantı türleri; bölüm 3.3'te anlatılan sonlu elemanların şekilleri, dağılımları ve sayıları; başlangıç şartları ve yine bölüm 3.3'te anlatılan analiz ayarları gibi birçok parametre üzerinde durularak gerçekleştirilen uzun süreli analizler sonucu gerçeğe en çok yaklaşan nihai bir analiz seçilmiş olup sonuçları deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. Analizler gerçekleştirilirken sonlu eleman şekil ve boyutları ile, seramikler ve katmanlar arası bağlantı tanımlarının, analizin daha gerçekçi sonuçlar vermesinde büyük etken olduğu görülmüştür.

Yapılan çalışmalarda elde edilen sonuçlara göre, merminin hızının zırha ilk temas ettikten yaklaşık 0,12 milisaniye sonra sıfırlandığı; bu hız ve kinetik enerjisinin yaklaşık 70%'lik kısmının, çarpışmadan sonraki 0,035 milisaniye içerisinde, seramik katmanda konik kırılma olduğu süre zarfında sönmüldüğü görülmüştür.

Seramik karolar arasında yapıştırıcı katman tanımlanmadığında, seramik karoların bir bütün gibi davranıp kılcal çatlakların bile sapma olmadan bir seramik karodan diğerine devam ettiği; bunun gerçekte elde edilen sonuçlarla ters düştüğü; bu yüzden seramik karoların arasına 0,5 mm kalınlığında epoksi reçine tabakası tanımlanmasının gerçeğe daha yakın sonuçlar verdiği görülmüştür.

Zırh sisteminin ön yüzeyini oluşturan seramik katmanda oluşan yapısal deformasyon ele alındığında, en büyük deformasyonun merminin isabet ettiği seramik karo üzerinde olduğu; bu deformasyonun radyal çatlaklar ve kalınlık boyunca konik kırılma biçimde başladığı; teğetsel çatlaklar oluşmaya başladıktan sonra ise irili ufaklı parçalanmaya dönüştüğü ve parçaların ana gövdeden ayrıldığı anlaşılmaktadır.

Darbeye maruz kalan merkez seramik karoya komşu olan çevre seramik karolarda ise, deformasyonların genellikle kılcal çatlaklar şeklinde devam ettiği; bu seramik karoların önyüzeylerinde hem radyal hem de teğetsel çatlaklar oluştuğu; arka yüzeylerinde ise çatlakların çok büyük oranla çarpma merkezinden kenarlara doğru radyal şekilde oluştuğu gözlemlenmiştir.

Analizlerde elde edilen sonuçlar, balistik testleri gerçekleştirilen dört farklı deney numunesi ile karşılaştırıldığında, oluşan kırılma konisi, hasar büyüklüğü ve yapısı, çatlak yayılımı, mermi hasarı, arka destek katmanındaki göçük miktarı gibi bir çok özellik bakımından birbirlerine mükemmele yakın şekilde uyum sağladığı görülmüştür.

Bu doğrultuda oluşturulan model üzerinde değişiklikler yapılarak; farklı dizilim ve farklı geometri yapılarındaki zırh sistemi tasarımlarının üretimleri yapılmadan önce modellemelerinin yapılabileceği kanaatine varılmıştır. Bu sayede, analizler yardımıyla elde edilecek önfikir sayesinde, gereksiz zaman ve maliyet kayıplarının önüne geçilmesi hedeflenmektedir.

Seramik kompozit zırh sistemlerinin darbe davranışlarının sayısal modellemesi sırasında, malzeme modellerinde bulunan girdiler, sonlu eleman dağılımları, sonlu elemanların boyutları ve yapıları, bağlantı tipleri, başlangıç ve sınır şartları gibi onlarca girdi mevcuttur. Bu girdilerin kombinasyonları düşünüldüğünde çok fazla farklı analiz sonucu doğurmaktadır. Bu parametrelerden her birinin değiştirilerek farklı kombinasyonları ile ideal analizleri yaptırmak için çok uzun yıllar gerekmektedir. Bu nedenle, literatürde yer alan farklı çalışmalar baz alınarak, yapılmak istenen çalışmaya yönelik yeni modellemeler geliştirmek zaman açısından büyük önem teşkil etmektedir.

Bu tez kapsamında yer alan deneysel çalışmaların ve oluşturulan sayısal modelin de literatüre başka bir bakış açısı sağlaması, ileride geliştirilerek ve gerçeğe daha da yakın sonuçlar verebilecek bir araştırma konusuna altyapı sağlaması beklenmektedir.



KAYNAKLAR

1. National Research Council. (2011). *Opportunities in protection materials science and technology for future army applications*. Washington D.C.: The National Academies Press, 12-13.
2. Evci, C. (2009). *Seramik Kompozit Zırh Sistemlerinin Darbe ve Balistik Özelliklerinin Belirlenmesi*. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 1-259.
3. Senf, H., Rothenhäusler, H. (1992, January). *Crack behavior and dynamic response of Alumina under impact loading*. Paper presented at International Conference on Shock-Wave and High-Strain-Rate Phenomena in Materials, San Diego, CA.
4. National Standards Institute. (2009). *MIL-DTL-12560 Armor plate, steel, wrought, homogeneous (for use in combat-vehicles and for ammunition testing)*. Washington DC: American National Standards Institute.
5. National Standards Institute. (2008). *MIL-DTL-46100 Armor plate, steel, wrought, high-hardness*. Washington D.C.: American National Standards Institute.
6. Jung, W.K., Lee, H.S., Jung, J.W., Ahn, S.H., Lee, W.L., Kim, H.J., Kwon, J.W. (2007). Penetration mechanisms of ceramic composite armor made of Alumina-GFRP. *International Journal of Precision Engineering And Manufacturing*, 8(4), 38-44.
7. Hamouda, A.M.S., Hashmi M.S.J. (1998). Testing of composite materials at high rates of strain: advances and challenges. *Journal of Materials Processing Technology*, 77(1-3), 327–336.
8. Navarro, C. (1993). Modelling of high velocity impact on woven fabrics and composite materials. *Proceedings of the Ninth International Conference on Composite Materials (ICCM/9)*, Madrid: Woodhead Publishing Limited, 1, 131-138.
9. Sarıtaş, S. (1995). *Engineering metallurgy and materials*. Ankara: Gazi Üniversitesi İletişim Fakültesi Basımevi, 307-308.
10. Schubel, P.M., Luo, J.J., Daniel, I.M. (2005). Low velocity impact behavior of composite sandwich panels. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 36(10), 1389-1396.
11. Kalay, Y.E., Ögel, B., Yıldırım, R.O. (2004). *Tek ve Çok Katmanlı AA2024 Plakalarının Düşük Hızlarda Darbe Karakterizasyonu*. SAVTEK 2004 Savunma Teknolojileri Kongresinde sunuldu, ODTÜ, Ankara.
12. Evci, C., Gülgeç, M. (2012). An experimental investigation on the impact response of composite materials. *International Journal of Impact Engineering*, 43, 40-51.
13. Hopkinson, J. (1872). On the rupture of iron wire by a blow. *Proceedings of the Manchester Literary and Philosophical*, 11, 40-45.
14. Hopkinson, J. (1872). Further experiments on the rupture of iron wire. *Proceedings of the Manchester Literary and Philosophical*, 11, 119-121.

15. Hopkinson, B. (1905). The Effects of Momentary Stresses in Metals. *Proceedings of the Royal Society*, 74, 498-506.
16. Hopkinson, B. (1913). A method of measuring the pressure produced in the detonation of high explosives or by the impact of bullets. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 213, 437-456.
17. Davies, R.M. (1948). A critical study of the Hopkinson pressure bar. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 240(821), 375-457.
18. Kolsky, H. (1949). An investigation of the mechanical properties of materials at very high rates of loading. *Proceedings of the Physical Society B*, London. 62(11), 676-700.
19. Krafft, J.M., Sullivan, A.M., Tripper, C.F. (1954). The effect of static and dynamic loading and temperature on the yield stress of iron and mild steel in compression. *Proceedings of the Royal Society A*, 221(1144), 114-127.
20. Goyal, R., Venkataraman, B. (2017). Comparison of High-strain Rate Behaviour of OFHC Copper Using Dynamic Indentation and Split Hopkinson Pressure Bar Techniques. *Procedia Engineering*, 173, 830-836.
21. Sharma, P., Chandel, P., Bhardwaj, V., Singh, M., Mahajan, P. (In Press). Ballistic impact response of high strength aluminium alloy 2014-T652 subjected to rigid and deformable projectiles. *Thin-Walled Structures*, 1-15.
22. Bandaru, A.K., Ahmad, S., Bhatnagar, N. (2017). Ballistic performance of hybrid thermoplastic composite armors reinforced with Kevlar and basalt fabrics. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 97, 151-165.
23. Walley, S.M. (2010). Historical review of high strain rate and shock properties of ceramics relevant to their application in armour. *Advances in Applied Ceramics*, 109(8), 446-466.
24. İnternet: Chheda, M., Normandia, M.J., Shih, J. (2006). Ceramic Defense: Improving Ceramic Armor Performance, *Ceramic Industry* Web: <https://www.ceramicindustry.com/articles/87826-ceramic-defense-improving-ceramic-armor-performance> adresinden 30 Aralık 2013'te alınmıştır.
25. Backman, M.E., Goldsmith, W. (1976). The mechanics of penetration of projectiles into targets. *International Journal of Engineering Science*, 16(1), 1-99.
26. Backman, M.E. (1976). *Terminal Ballistic*. California: National Technical Information Service, Research Department, 72-76.
27. Zukas, J.A. (1980). *Impact Dynamics: Theory and Experiment*. Maryland: Army Ballistic Research Laboratory Aberdeen Proving Ground, 6-17.
28. Zukas, J. A., Nicholas, T., Swift, H. F., Greszczuk, L. B., Curran, D.R., Longin, B. (1982). *Impact Dynamics*. New York: John Wiley and Sons, 155-183.

29. Corbett, G.G., Reid, S.R., Johnson, W. (1996). Impact loading of plates and shells by free-flying projectiles; A review. *International Journal of Impact Engineering*, 18(2), 141-230.
30. Chinella, J.F., Pothier, B., Wells, M.G.H. (1998). *Processing, Mechanical Properties and Ballistic Impact Effects of Austempered Ductile Iron*. Maryland: Army Research Laboratory, Aberdeen Proving Ground, 4-30.
31. Chen, W.W., Rajendran, A.M., Song, B., Nie, X. (2007). Dynamic fracture of ceramics in armor applications. *Journal of the American Ceramic Society*, 90(4), 1005-1018.
32. Lundberg, P., Renström, R., Lundberg, B. (2000). Impact of metallic projectiles on ceramic targets: translation between interface defeat and penetration. *International Journal of Impact Engineering*, 24, 259-275.
33. Kaufmann, C., Cronina, D., Worswicka, M., Pageaub G., Bethc, A. (2003). Influence of material properties on the ballistic performance of ceramics for personal body armour. *Journal of Shock and Vibration*, 10(1), 51-58.
34. Chian, S.C., Tan, B.C.V., Sarma, A. (2017). Projectile penetration into sand: Relative density of sand and projectile nose shape and mass. *International Journal of Impact Engineering*, 105, 80-88.
35. Dateraksa, K., Sujirote, K., McCuiston, R., Atong, D. (2012). Ballistic performance of ceramic/s-glass composite armor. *Journal of Metals, Materials and Minerals*, 22(2), 33-39.
36. Geandier, G., Denis, S., Hazotte, A., Mocellin, A. (2005). Hertzian crack analysis in alumina chromium composites. *Journal of the European Ceramic Society*, 25(7), 1119-1132.
37. Kawai, N., Tsurui, K., Shindo, D., Motoyashiki, Y., Sato, E. (2011). Fracture behavior of silicon nitride ceramics subjected to hypervelocity impact. *International Journal of Impact Engineering*, 38(7), 542-545.
38. Straßburger, E. (2009). Ballistic testing of transparent armour ceramics. *Journal of the European Ceramic Society*, 29(2), 267-273.
39. Appleby-Thomas, G.J., Wood, D.C., Hameed, A., Painter, J., Fitzmaurice, B. (2017). On the effects of powder morphology on the post-comminution ballistic strength of ceramics. *International Journal of Impact Engineering*, 100, 46-55.
40. Chen, L., Zheng, K., Fang, Q. (2017). Effect of strain rate on the dynamic tensile behaviour of UHMWPE fibre laminates. *Polymer Testing*, 63, 54-64.
41. Lässig, T., Bagusat, F., Pfändler, S., Gulde, M., Heunoske, D., Osterholz, J., Stein, W., Nahme, H., May, M. (2017). Investigations on the spall and delamination behavior of UHMWPE composites. *Composite Structures*, 182, 590-597.

42. Fallah, A.S., Micallef, K., Langdon, G.S., Lee, W.C., Curtis, P.T., Louca, L.A. (2014). Dynamic response of Dyneema® HB26 plates to localised blast loading. *International Journal of Impact Engineering*, 73, 91-100.
43. Jiusti, J., Kammer, E.H., Neckel, E., Lóh, N.J., Trindade, W., Silva, A.O., Montedo, O.R.K., De Noni Jr., A. (2017). Ballistic performance of Al₂O₃ mosaic armors with gap-filling materials. *Ceramics International*, 43(2), 2697-2704.
44. Zaera, R., Sánchez-Sáez, S., Pérez-Castellanos, J.L., Navarro, C. (2000). Modelling of the adhesive layer in mixed ceramic/metal armours subjected to impact. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 31(8), 823-833.
45. López-Puente, J., Arias, A., Zaera, R., Navarro, C. (2005). The effect of the thickness of the adhesive layer on the ballistic limit of ceramic/metal armours. An experimental and numerical study. *International Journal of Impact Engineering*, 32(1-4), 321-336.
46. ANSYS, Inc. (2012). *Ansys Autodyn User's Manual* (Release 14.5). Canonsburg: ANSYS, Inc., 1-496.
47. ANSYS, Inc. (2013). *Autodyn Composite Modelling* (Release 15.0). Canonsburg: ANSYS, Inc., 1-63.
48. İnternet: ANSYS, Inc. (2013). *Structural Analysis: Explicit Dynamics*. Web: <http://www.ansys.com/Products/Simulation+Technology/Structural+Analysis/Explicit+Dynamics> adresinden Aralık 2013'te alınmıştır.
49. İnternet: Figes Mühendislik. (2013). *Yapısal Mekanik*. Web: <http://www.figes.com.tr/ansys/structural-mechanics.php> adresinden Aralık 2013'te alınmıştır.
50. İnternet: Figes Mühendislik. (2013). *Ansys Autodyn*. Web: <http://www.figes.com.tr/ansys/autodyn.php> adresinden Aralık 2013'te alınmıştır.
51. Harewood, F.J., McHugh, P.E. (2007). Comparison of the implicit and explicit finite element methods using crystal plasticity. *Computational Materials Science*, 39(2), 481-494.
52. Beidokhti, H.N., Janssena, D., Khoshgoftar, M., Sprengers, A., Perdahcioglu, E.S., Van den Boogaard, T., Verdonschot, N. (2016). A comparison between dynamic implicit and explicit finite element simulations of the native knee joint. *Medical Engineering and Physics*, 38(10), 1123-1130.
53. Tan, P. (2014). Ballistic protection performance of curved armor systems with or without debondings-delaminations. *Materials and Design*, 64, 25-34.
54. Mendelson, A. (1968). *Plasticity: Theory and Application* (First Edition). New York: The MacMillan Copmany, 70-79.
55. Liu, W., Chen, Z., Chen, Z., Cheng, X., Wang, Y., Chen, X., Liu, J., Li, B., Wang, S. (2015). Influence of different back laminate layers on ballistic performance of ceramic composite armor. *Materials and Design*, 87, 42-427.

56. Johnson, G.R., Cook, W.H. (1983, 19-21 April). *A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperature*. Proceedings of the 7th International Symposium on Ballistics, The Hague, Netherlands. 541-547.
57. Johnson, G.R., Holmquist, T.J. (1994). An improved computational constitutive model for brittle materials. *American Institute of Physics Conference Proceedings*, 309(1), 981-984.
58. Uğural, A.C., Fenster, S.K. (2009). *Advanced Strength and Applied Elasticity* (Fourth Edition). New Jersey: Prentice Hall, 51-71.
59. Moaveni, S. (2008). *Finite Elements Analysis: Theory and Application with ANSYS* (Third Edition). USA: Pearson Education Inc., 316-343, 687-699.
60. Kim, N.H., Sankar, B.V. (2009). *Introduction to Finite Element Analysis and Design* (First Edition). New York: John Wiley & Sons, Inc, 1-415.
61. Ramadhan, A.A., Abu Talib, A.R., Mohd Rafie, A.S., Zahari, R. (2013). High velocity impact response of Kevlar-29/epoxy and 6061-T6 aluminum laminated panels. *Materials and Design*, 43, 307-321.
62. Krishnan, K., Sockalingam, S., Bansal, S., Rajan, S.D. (2010). Numerical simulation of ceramic composite armor subjected to ballistic impact. *Composites: Part B: Engineering*, 41(8), 583-593.
63. Hu, D., Zhang, Y., Shen, Z., Cai, Q. (2017). Investigation on the ballistic behavior of mosaic SiC/UHMWPE composite armor systems. *Ceramics International*, 43(13), 10368–10376.
64. Ong, C.W., Boey, C.W., Hixson, R.S., Sinibaldi, J.O. (2011). Advanced layered personnel armor. *International Journal of Impact Engineering*, 38(5), 369-383.
65. Liu, W., Chen, Z., Cheng, X., Wang, Y., Amankwa, A.R., Xu, J., (2017). Design and ballistic penetration of the ceramic composite armor. *Composites Part B: Engineering*, 84, 33-40.





EKLER

EK-1 Seramik ISO9001 Belgesi



QUALITY MANAGEMENT SYSTEM CERTIFICATE

Certificate No.: 00115Q210285R0S/3500

We hereby certify that

XIAMEN INNOVACERA ADVENCED MATERIALS CO., LTD.

Unit 4G, West Side, Lianchang Bldg, NO.6-8 Huli Avenue, Huli District,
Xiamen City, Fujian Province, China.

by reason of its
Quality Management System
has been awarded this certificate for compliance with the standard
ISO9001: 2008
GB/T 19001-2008

The Quality Management System Applies in the following area:
Design and Production of Alumina Ceramic

Certified since: May. 18, 2012 Valid from: May. 18, 2012 Valid until: May. 17, 2015

After a surveillance cycle, the certificate is valid only when used together with an Acceptance Notice of Surveillance Audit issued by CQC.
Please access www.cqc.com.cn for checking validity of the certificate.







Signed by: Wang Kejiao

CHINA QUALITY CERTIFICATION CENTRE

Section 9, No.188, Nansihuan(the South Fourth Ring Road) Xilu(West Road), Beijing 100070,China
<http://www.cqc.com.cn>

Q 0003786 2009年版

EK-2 Seramik Laboratuvar Analizi

**Test Report**

No. XMNMLC1400444702

Date: 02 Dec 2014

Page 1 of 3

XIAMEN INNOVACERA ADVANCED MATERIALS CO.,LTD

UNIT 4G LIANGCHANG BLDG,NO6-8 HULI AVE HULI DIST XIAMEN FUJIAN CHINA 361004

The following sample(s) was/were submitted and identified on behalf of the clients as : ALLUMINA CERAMICS

SGS Job No. : XMCCM141101220 - XM

Date of Sample Received : 27 Nov 2014

Testing Period : 27 Nov 2014 - 02 Dec 2014

Test Requested : Selected test(s) as requested by client.

Test Method : Please refer to next page(s).

Test Results : Please refer to next page(s).

Conclusion : Based on the performed tests on submitted sample(s), the results of Lead, Mercury, Cadmium, Hexavalent chromium, Polybrominated biphenyls (PBBs), Polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) comply with the limits as set by RoHS Directive 2011/65/EU Annex II; recasting 2002/95/EC.

Signed for and on behalf of
SGS-CSTC Ltd.

Michael Tso
Approved Signatory

This document is issued by the Company subject to its General Conditions of Service printed overleaf, available on request or accessible at http://www.sgs.com/terms_and_conditions.htm and, for electronic format documents, subject to Terms and Conditions for Electronic Documents at www.sgs.com/terms_e-document.htm. Attention is drawn to the limitation of liability, indemnification and jurisdiction issues defined therein. Any holder of this document is advised that information contained hereon reflects the Company's findings at the time of its inspection only and, within the limits of Client's instructions, if any. The Company's sole responsibility is to its Client and this document does not exonerate parties to a transaction from exercising all their rights and obligations under the transaction documents. This document cannot be reproduced except in full, without prior written approval of the Company. Any unauthorized alteration, forgery or falsification of the content or appearance of this document is unlawful and offenders may be prosecuted to the fullest extent of the law. Unless otherwise indicated the results shown in this test report refer only to the sample(s) tested.

SGS-CSTC Standards Technical Services (Tianjin) Co., Ltd.
Chemical Laboratory

SGS Mansion, No. 41, The 5th Avenue TEDA, Tianjin, China 300457 t (86-22) 65288000 f (86-22) 25295252 www.cn.sgs.com
中国·天津市经济技术开发区第五大街41号SGS大厦 邮编: 300457 t (86-22) 65288000 f (86-22) 25295252 e sgs.china@sgs.com

Member of the SGS Group (SGS SA)

EK-2 (devam) Seramik Laboratuvar Analizi



Test Report

No. XMNMLC1400444702

Date: 02 Dec 2014

Page 2 of 3

Test Results :

Test Part Description :

Specimen No.	SGS Sample ID	Description
SN1	XMN14-004447.003	Beige ceramic

Remarks :

- (1) 1 mg/kg = 0.0001%
- (2) MDL = Method Detection Limit
- (3) ND = Not Detected (< MDL)
- (4) "-" = Not Regulated

RoHS Directive 2011/65/EU

Test Method : (1)With reference to IEC 62321-5:2013, determination of Cadmium by ICP-OES.
 (2)With reference to IEC 62321-5:2013, determination of Lead by ICP-OES.
 (3)With reference to IEC 62321-4:2013, determination of Mercury by ICP-OES.
 (4)With reference to IEC 62321:2008, determination of Hexavalent Chromium by Colorimetric Method using UV-Vis.
 (5)With reference to IEC 62321:2008, determination of PBBs and PBDEs by GC-MS.

Test Item(s)	Limit	Unit	MDL	003
Cadmium (Cd)	100	mg/kg	2	ND
Lead (Pb)	1,000	mg/kg	2	ND
Mercury (Hg)	1,000	mg/kg	2	ND
Hexavalent Chromium (CrVI)	1,000	mg/kg	2	ND
Sum of PBBs	1,000	mg/kg	-	ND
Monobromobiphenyl	-	mg/kg	5	ND
Dibromobiphenyl	-	mg/kg	5	ND
Tribromobiphenyl	-	mg/kg	5	ND
Tetrabromobiphenyl	-	mg/kg	5	ND
Pentabromobiphenyl	-	mg/kg	5	ND
Hexabromobiphenyl	-	mg/kg	5	ND
Heptabromobiphenyl	-	mg/kg	5	ND
Octabromobiphenyl	-	mg/kg	5	ND
Nonabromobiphenyl	-	mg/kg	5	ND
Decabromobiphenyl	-	mg/kg	5	ND
Sum of PBDEs	1,000	mg/kg	-	ND
Monobromodiphenyl ether	-	mg/kg	5	ND

This document is issued by the Company subject to its General Conditions of Service printed overleaf, available on request or accessible at http://www.sgs.com/terms_and_conditions.htm and for electronic format documents, subject to Terms and Conditions for Electronic Documents at www.sgs.com/terms_e-document.htm. Attention is drawn to the limitation of liability, jurisdiction and jurisdiction issues defined therein. Any holder of this document is advised that information contained hereon reflects the Company's findings at the time of its inspection only and within the limits of Client's instructions, if any. The Company's sole responsibility is to its Client and this document does not exonerate parties to a transaction from exercising all their rights and obligations under the transaction documents. This document cannot be reproduced except in full, without prior written approval of the Company. Any unauthorized alteration, forgery or falsification of the content or appearance of this document is unlawful and offenders may be prosecuted to the fullest extent of the law. Unless otherwise indicated the results shown in this test report refer only to the sample(s) tested.

SGS-CTI (Shanghai) Technical Service Co., Ltd.
 Chemical Laboratory

SGS Mansion, No. 41, The 5th Avenue TEDA, Tianjin, China 300457 t (86-22) 65288000 f (86-22) 25295252 www.cn.sgs.com
 中国·天津市经济技术开发区第五大街41号SGS大厦 邮编: 300457 t (86-22) 65288000 f (86-22) 25295252 e sgs.china@sgs.com

Member of the SGS Group (SGS SA)

EK-2 (devam) Seramik Laboratuvar Analizi



Test Report

No. XMNMLC1400444702

Date: 02 Dec 2014

Page 3 of 3

Test Item(s)	Limit	Unit	MDL	003
Dibromodiphenyl ether	-	mg/kg	5	ND
Tribromodiphenyl ether	-	mg/kg	5	ND
Tetrabromodiphenyl ether	-	mg/kg	5	ND
Pentabromodiphenyl ether	-	mg/kg	5	ND
Hexabromodiphenyl ether	-	mg/kg	5	ND
Heptabromodiphenyl ether	-	mg/kg	5	ND
Octabromodiphenyl ether	-	mg/kg	5	ND
Nonabromodiphenyl ether	-	mg/kg	5	ND
Decabromodiphenyl ether	-	mg/kg	5	ND

*** End of Report ***

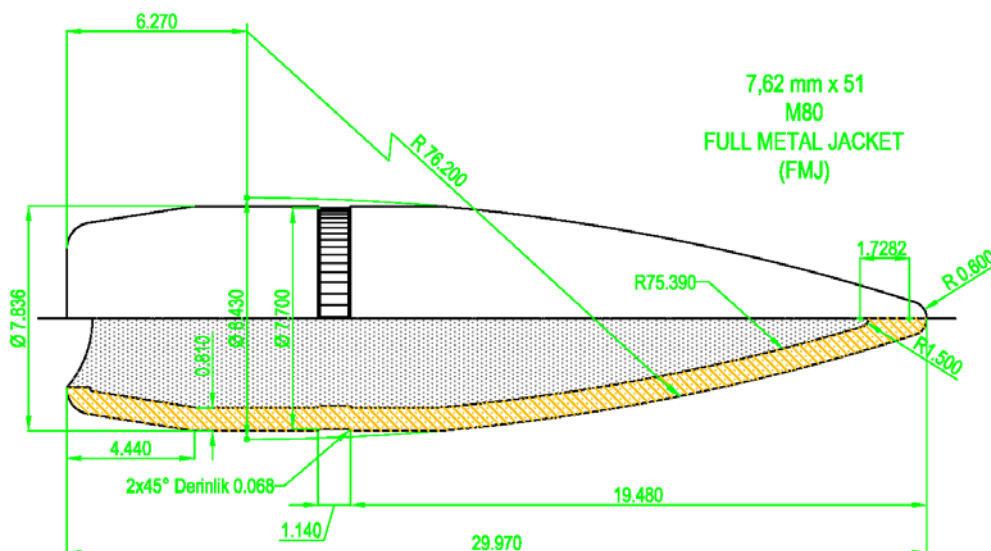
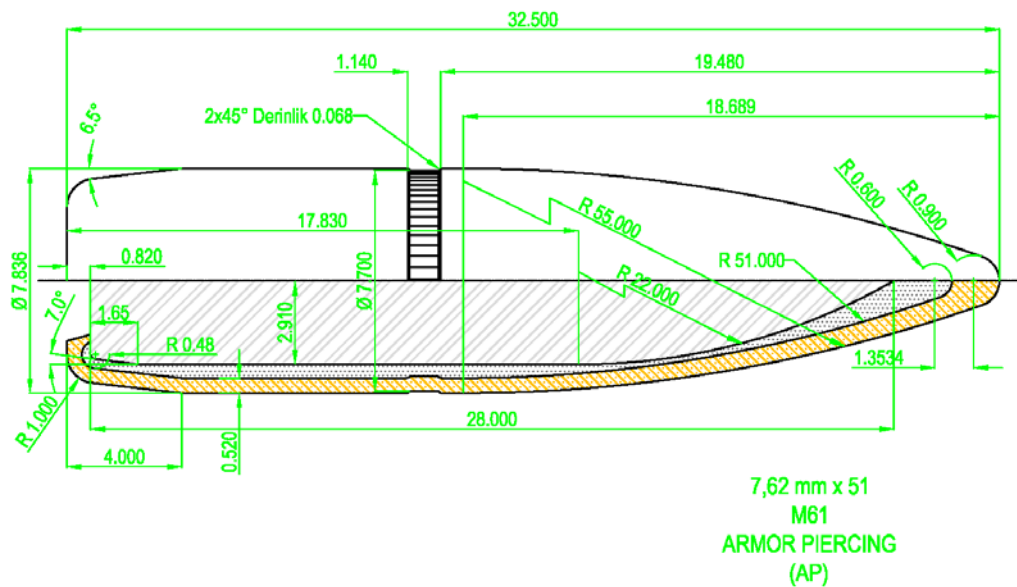
This document is issued by the Company subject to its General Conditions of Service printed overleaf, available on request or accessible at http://www.sgs.com/terms_and_conditions.htm and for electronic format documents, subject to Terms and Conditions for Electronic Documents at www.sgs.com/terms_e-document.htm. Attention is drawn to the limitation of liability, indemnification and jurisdiction issues defined therein. Any holder of this document is advised that information contained hereon reflects the Company's findings at the time of its inspection only and within the limits of Client's instructions, if any. The Company's sole responsibility is to its Client and this document does not exonerate parties to a transaction from exercising all their rights and obligations under the transaction documents. This document cannot be reproduced except in full, without prior written approval of the Company. Any unauthorized alteration, forgery or falsification of the content or appearance of this document is unlawful and offenders may be prosecuted to the fullest extent of the law. Unless otherwise indicated the results shown in this test report refer only to the sample(s) tested.

SGS-CTI Standards Technical Services (Tianjin) Co., Ltd.
Chemical Lab. (Tianjin Service)

SGS Mansion, No. 41, The 5th Avenue TEDA, Tianjin, China 300457 t (86-22) 65288000 f (86-22) 25295252 www.cn.sgs.com
中国·天津市经济技术开发区第五大街41号SGS大厦 邮编: 300457 t (86-22) 65288000 f (86-22) 25295252 e sgs.china@sgs.com

Member of the SGS Group (SGS SA)

EK-3 7,62 mm x51 AP ve FMJ Mermi teknik resimleri



	TARİH	İSİM	İMZA	SAYI	AÇIKLAMA	-	AĞIRLIK
TASARIM	30.01.2002	MAKELC.		-	ÇİZİM NO	TUR050802-00 ve TUR05800-00	M81 (9,45g±0,15) M80 (8,85g±0,2)
ÇİZİM	23.03.2015	M.A.A.		ÖLÇÜ BİRİMİ	PARÇA ADI	7.62mm x 51 Calibre Mermi	PAFTA EBADİ
KONTROL	-	-	-	MM			A4
ÖLÇEK	KURUM	GAZİ ÜNİVERSİTESİ MÜHENDİSLİK FAKÜLTESİ MAYKNA MÜHENDİSLİĞİ BÖLÜMÜ			M61 AP (Çalılık Çukırdaki Zırh Daliği) M80 FMJ (Bakar Çekirdek Kaplı Kurşun)		SAYFA NO
5/1							1/1

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : AKDOĞAN, Mehmet Akif
 Uyuğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 14.01.1981, Ankara
 Medeni hali : Evli
 Telefon : 0 (312) 582 34 49
 Faks : -
 e-mail : maakdogan@gazi.edu.tr



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Tarih
Doktora	Gazi Üniversitesi / Fen Bilimleri Enstitüsü	2009/02 – 2018/01
Yüksek Lisans	Gazi Üniversitesi / Fen Bilimleri Enstitüsü	2005/09 – 2008/12
Lisans	Gazi Üniversitesi / Makine Mühendisliği	1999/09 – 2005/06
Lise	Yabancı Dil Ağırlıklı Ellinci Yıl Süper Lisesi	1995/09 – 1999/06

Askerlik

	Tarih
Zırhlı Birlikler Okul ve Eğitim Tümen Komutanlığı, Asteğmen Aday Kurs Bölüğü, Etimesgut / Ankara	2010/04 – 2010/06
28'inci Mekanize Piyade Tümeni, 28'inci Mekanize Piyade Alayı, Tank Taburu, Akdoğan / KKTC,	2010/06 – 2011/03

İş Deneyimi

Yıl	Görev Yeri	Görev
2005/12 - Halen	Gazi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi	Araştırma Görevlisi
2005/06 - 2005/12	Artek Proses Isı İmalat Ltd. Şti. / Ankara	Üretim Mühendisi

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

Akdoğan, M.A., (2009). *Düşük enerjili serbest ağırlık düşme test düzeneği tasarım ve imalatı, düşük enerji seviyelerinde darbe testi yapılması*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 1-87.

Akdoğan, M.A., Türkbaş, O.S., (2016). Konkav ve Düz Yüzey Şekilli Seramik Zırhların Balistik Performansının Sayısal Modellenmesi. *Gazi Journal of Engineering Sciences*, 2(2), 91-106.

Türkbaş, O.S., Özdemir, Z., Akdoğan, M.A., (2016). Computer Aided Simulation Of Wire Cutting Systems In Helicopters - A Workout On Aluminium Wire. *Electronic Journal of Machine Technologies*, 13(3), 41-54.

Projeler

Araştırmacı (Şubat 2015 – Eylül 2017). *Future Engineers with Multilingual Vocational Foreign Languages*. Avrupa Birliği Projesi, 2014-1-TR-KA202-013214.

Yazılım Bilgisi

Microsoft Windows, DOS, IOS
Microsoft Office,
Fortran, Mathematica, Matlab,
Autocad, Inventor, Mechanical Desktop,
Ansys, Autodyn,
3DS Max, Photoshop, InDesign, Illustrator, Corel Draw

Hobiler

Sportif Latin ve Salon Dansları (Eski Lisanslı Sporcu), Amerikan Futbolu (Eski Lisanslı Sporcu), Voleybol (Eski Lisanslı Sporcu), Basketbol,
Grafik Tasarımı / Web Tasarımı,
Diorama, Statik Maketler, RC Modeller.

Üyelikler

Makine Mühendisleri Odası (Üye)
Diamond Dans Gençlik ve Spor Kulübü (Kurucu ve Yönetim Kurulu Üyesi)



GAZİ GELECEKTİR..