T.C.
ERCİYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ULTRA YÜKSEK MOLEKÜL AĞIRLIKLI POLİETİLEN (UHMWPE) KASKIN BALİSTİK DARBE ETKİSİ ALTINDAKİ DAVRANIŞININ DENEYSEL VE NÜMERİK İNCELENMESİ

Hazırlayan
İsmail Furkan SARUHAN

Danışman
Prof. Dr. Recep GÜNEŞ

Yüksek Lisans Tezi

AĞUSTOS 2024
KAYSERİ

T.C.
ERCİYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ULTRA YÜKSEK MOLEKÜL AĞIRLIKLI POLİETİLEN (UHMWPE) KASKIN BALİSTİK DARBE ETKİSİ ALTINDAKİ DAVRANIŞININ DENEYSEL VE NÜMERİK İNCELENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Hazırlayan
İsmail Furkan SARUHAN

Danışman
Prof. Dr. Recep GÜNEŞ

Bu çalışma, Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından FBAÜ-2023- 12517 kodlu proje ile desteklenmiştir.

AĞUSTOS 2024
KAYSERİ

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK

Bu çalışmadaki tüm bilgilerin, akademik ve etik kurallara uygun bir şekilde elde edildiğini beyan ederim. Aynı zamanda bu kural ve davranışların gerektirdiği gibi, bu çalışmanın özünde olmayan tüm materyal ve sonuçları tam olarak aktardığımı ve referans gösterdiğimi belirtirim.

İsmail Furkan SARUHAN

İmza

“Ultra Yüksek Molekül Ağırlıklı Polietilen (UHMWPE) Kaskın Balistik Darbe Etkisi Altındaki Davranışının Deneysel ve Nümerik İncelenmesi” adlı Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi Lisansüstü Tez Önerisi ve Tez Yazma Yönergesi’ ne uygun olarak hazırlanmıştır.

Hazırlayan	**Danışman**
İsmail Furkan SARUHAN	Prof Dr Recep GÜNEŞ
İmza	İmza

Makine Mühendisliği Bölümü ABD Başkanı

Prof. Dr. S. Orhan AKANSU

İmza

TEŞEKKÜR

Tez çalışmamın her aşamasında maddi ve manevi her türlü desteği sağlayan, bilgi ve tecrübelerinden faydalandığım, mesleki hayatımda başarılı bir şekilde ilerlememde büyük pay sahibi, çok değerli danışman hocam Prof. Dr. Recep GÜNEŞ'e en derin saygılarımı sunar, teşekkürü borç bilirim.

Tez çalışmam boyunca desteklerini ve yardımlarını esirgemeyen her zaman yol gösteren, bilgilerini esirgemeyen sayın Ar. Gör. Mevlüt HAKAN ve sayın Dr. Kadir KAYA'ya en içten saygılarımı sunar, teşekkür ederim.

Akademik çalışmalarımda bana her desteği sunan, maddi ve manevi her zaman destekleyen, tezin yazılmasında imkanlarını kullanmama izin veren C.E.S. İleri Kompozit ve Savunma Teknolojileri A.Ş.'ye, değerli yöneticilerime, özellikle sayın Murat GİRAY'a ve sayın Abdurrahim ŞİŞMAN'a teşekkür ederim.

Tüm hayatım boyunca beni destekleyen, bana güvenen, tez esnasında karşılaştığım problemleri aşmamda yardımcı olan ve göstermiş oldukları sabırdan dolayı sevgili annem Mine SARUHAN, sevgili babam İslam SARUHAN ve sevgili eşim İlayda Tuğgen SARUHAN'a çok teşekkür eder çalışmamı onlara ve sevgili kızım Azra Talya SARUHAN'a armağan ederim.

İsmail Furkan SARUHAN

Ağustos / 2024 KAYSERİ

ULTRA YÜKSEK MOLEKÜL AĞIRLIKLI POLİETİLEN (UHMWPE) KASKIN BALİSTİK DARBE ETKİSİ ALTINDAKİ DAVRANIŞININ DENEYSEL VE NÜMERİK İNCELENMESİ

İsmail Furkan SARUHAN

Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
Yüksek Lisans Tezi, Ağustos 2024
Danışman: Prof. Dr. Recep GÜNEŞ

ÖZET

Modern kasklar konvansiyonel savaş durumlarında ve asimetrik askeri çatışmalarda askeri personelin baş bölgesini koruyan giyilebilir bir zırh çeşididir. Günümüzde kullanılan, modern, en gelişmiş balistik kasklar düşük ağırlık, yüksek balistik performanslarıyla UHMWPE balistik kompozitlerinden üretilmektedir.

Bu tezde UHMWPE balistik kaskın üretim prosesleri gerçekleştirilmiştir ve dünya standartlarında hafif yüksek performanslı balistik bir kask üretilmiştir. Üretilen UHMWPE balistik kaskın, NIJ-0106.01 standardına göre balistik performansı deneysel olarak incelenmiştir. Kaskın beş farklı bölgesine 9 mm FMJ tehditler ateşlenmiş ve kaskın deformasyonu ve kompozit hasar mekanizmaları incelenmiştir.

Deneysel olarak testleri gerçekleştirilen kask için nümerik bir model oluşturulmuştur, deneysel olarak incelenen parametreler nümerik model ile karşılaştırılmış ve nümerik olarak da incelenmiştir.

Tez kapsamında oluşturulan nümerik modellerle deney sonuçları arasında oldukça iyi bir yakınsama sağlanmıştır. Balistik darbe etkisi altındaki UHMWPE kasklarının penetrasyon mekanikleri çözümlenmiş ve literatüre kazandırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Balistik Kasklar, Balistik Kompozitler, NIJ-0106.01, Sonlu Elemanlar Metodu, UHMWPE

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL INVESTIGATION OF ULTRA HIGH MOLECULAR WEIGHT POLYETHYLENE (UHMWPE) HELMET BEHAVIOUR UNDER BALLISTIC IMPACT

İsmail Furkan SARUHAN

Erciyes University, Graduate School of Natural and Applied Sciences
Master Thesis, August 2024
Supervisor: Prof. Dr. Recep GÜNEŞ

ABSTRACT

Modern helmets are a type of wearable armour that protects the head area of military personnel in conventional combat situations and asymmetric military conflicts. Modern ballistic helmets are manufactured from UHMWPE ballistic composites with low weight and high ballistic performance.

In this thesis, the production processes of the UHMWPE ballistic helmet were carried out and a lightweight high performance ballistic helmet was produced at world standards. The ballistic performance of the produced UHMWPE ballistic helmet was experimentally investigated according to NIJ-0106.01 standard. 9 mm FMJ threats were fired at five different parts of the helmet and the deformation of the helmet and composite damage mechanisms were examined.

A numerical model was created for the helmet tested experimentally, the parameters examined experimentally were compared with the numerical model and examined numerically.

A very good convergence was achieved between the numerical models created within the scope of the thesis and the experimental results. Penetration mechanics of UHMWPE helmets under ballistic impact have been analysed and introduced to the literature.

Keywords: Ballistic Helmets, Ballistic Composites, NIJ-0106.01, Finite Element Method, UHMWPE

İÇİNDEKİLER

ULTRA YÜKSEK MOLEKÜL AĞIRLIKLI POLİETİLEN (UHMWPE) KASKIN BALİSTİK DARBE ETKİSİ ALTINDAKİ DAVRANIŞININ DENEYSEL VE NÜMERİK İNCELENMESİ

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK i

YÖNERGEYE UYGUNLUK ii

KABUL VE ONAY iii

ÖNSÖZ iv

ÖZET v

ABSTRACT vi

İÇİNDEKİLER vii

KISALTMALAR x

TABLOLAR LİSTESİ xi

ŞEKİLLER LİSTESİ xii

GİRİŞ 1

1. BÖLÜM

GENEL BİLGİLER ve LİTERATÜR ÇALIŞMASI

1.1. Problem Durumu 3

1.1.1. Balistik Kompozit Malzemeler……..…….……..……4

1.1.1.1. Aramid Lifler (Kevlar)…….…… ……...…...6

1.1.1.2. Yüksek Performanslı Polietilenler (HPPE ve UHMWPE)……..7

1.1.1.3. PBO (Polybenzobisoxazole) Kumaşlar ……...…..9

1.1.1.4. Yüksek Performanslı Cam Lifler (GFRP) …….…..9

1.1.1.5. PPID (Polypyridobisimidazole) Lifleri …….…..11

1.1.2. Balistik…….……11

1.1.2.1. İç Balistik ……...…….……...12

1.1.2.2. Dış Balistik……12

1.1.2.3. Terminal Balistik ……12

1.1.3. Penetrasyon Mekaniği…..……13

1.1.4. Hasar Modları……...……...…...15

1.1.5. Alansal Yoğunluk…….……..…….17

1.1.6. Balistik Limit……..…….……..……..17

1.1.7. Kompozit Plakaların Balistik Hasarı…….……..19

1.1.8. Balistik Darbe Mekanizmaları……...21

1.1.8.1. Deneysel Metot……..21

1.1.8.2.Analitik Model Metodu…….....……22

1.1.8.3.Nümerik Model Metodu…….……...……....22

1.1.8.4. Kombine Yaklaşım……....……...……23

1.2. Araştırmanın Amacı...…….……...28

1.3. Araştırmanın Önemi……..……..……...28

2. BÖLÜM

YÖNTEM VE MATERYAL

2.1.Yöntem …… 31

2.1.1. Balistik Kask Üretimi…...…….……..31

2.1.2. Balistik Deneyler……..34

2.2. Materyal….……39

2.2.1 Nümerik Ön Çalışmalar…….....39

2.2.2. Kask ve Kurşunun Sonlu Elemanlar Modeli……44

2.2.3. Malzeme Özellikleri ve Çözüm Denklemleri……50

3. BÖLÜM

BULGULAR

3.1 Nümerik Ön Çalışma Bulguları.....58

3.1.1. Kevlar Zırh Plakasının Balistik Limit Çalışması ……58

3.1.2. UHMWPE Zırh Plakasının Balistik Darbe Sonrası Artık Hız Çalışması.....61

3.1.3. Kevlar ve UHMWPE Kaskların Balistik Performanslarının Karşılaştırılması……63

3.2. UHMWPE Kask İçin Gerçekleştirilen Balistik Deneyler……...69

3.3. Balistik Kaskın Nümerik Çözümlenmesi……..……...77

3.3.1. UHMWPE Kaskın Ön Tarafına Yapılan Balistik Atışın Nümerik Çözümlenmesi……...…….77

3.3.2. UHMWPE Kaskın Arka Tarafına Yapılan Balistik Atışın Nümerik Çözümlenmesi……....80

3.3.3. UHMWPE Kaskın Sol Tarafına Yapılan Balistik Atışın Nümerik Çözümlenmesi……....83

3.3.4. UHMWPE Kaskın Sağ Tarafına Yapılan Balistik Atışın Nümerik Çözümlenmesi……86

3.3.5. UHMWPE Kaskın Üst Tarafına Yapılan Balistik Atışın Nümerik Çözümlenmesi……....89

3.3.6. Balistik Atış Sonrası Nümerik FMJ Deformasyonu ……92

3.4. Balistik Deneylerin ve Simülasyonların Karşılaştırılması……..94

4. BÖLÜM

TARTIŞMA-SONUÇ ve ÖNERİLER

4.1. Sonuçlar……105

4.2. Öneriler ……..…..…105

KAYNAKÇA 108

KISALTMALAR

ACH	:	Advanced Combat Helmet
ECH	:	Enhanced Combat Helmet
FSP	:	Fragment Simulating Projectile
BFD	:	Back Face Deformation
UHMWPE	:	Ultra High Molecular Weight Polyethylene
$\boldsymbol{V_{50}}$	:	Ballistic Limit
NIJ	:	National Institute of Justice
FMJ	:	Full Metal Jacketed

TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 1. NIJ balistik test standardı…..……..……...….37

Tablo 2. Balistik kask çalışmaları için mesh optimizasyonu...…….……41

Tablo 3. 9 mm tehdit ile FSP'nin mekanik özellikleri……..….42

Tablo 4. Kevlar ve UHMWPE malzeme özellikleri…….....43

Tablo 5. 9 mm FMJ malzeme modeli ve mekanik özellikleri.....51

Tablo 6. UHMWPE malzeme modeli ve mekanik özellikleri…….…….....56

Tablo7. Literatürdeki deneysel balistik limit çalışmaları ve bu çalışmada gerçekleştirilen balistik limit hesaplaması.....59

Tablo 8. Bu çalışmadan elde edilen V_r artık hızlarının literatürde sayısal olarak bulunan ve analitik olarak hesaplanan V_r artık hız değerleri ile karşılaştırılması…….61

Tablo 9. Kevlar ve UHMWPE kaskların balistik performans karşılaştırması.....67

Tablo 10. Deneysel balistik rapor ve travma değerleri...……...……...76

Tablo 11. Gerçekleştirilen deneysel ve nümerik balistik darbelerin travma sonuçlarının karşılaştırılması...……...…….…..10

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1. Balistik başlıkların evrimi…….....…….2
Şekil 2. Personel koruma bölgesi tamamen UHMWPE'den elde edilmiş İngiliz zırhlısı SPV 400…….…….....……...5
Şekil 3. Kompozitlerin dokuma örnekleri…….....……..5
Şekil 4. Balistik kevlar kumaş atış sonrası örnek gösterimi…….....7
Şekil 5. UHMWPE prepreg örneği.....8
Şekil 6. PBO balistik kumaşlara balistik atış sonrası örnek…….....9
Şekil 7. Cam fiberlerin balistik atış sonrası örneği…….....11
Şekil 8. Balistik darbe etkisi altında kompozit laminelerin davranışı ve örnek çalışma simülasyonu.....20
Şekil 9. Penetrasyon Modları…...…….....…….……24
Şekil 10. Balistik TBI (Beyin travması) örneği…….....30
Şekil 11. Balistik başlık üretim prosesi…...…….....……32
Şekil 12. Örnek balistik kask üretimi…… …….....……..33
Şekil 13. Balistik kask üretimi (CES Kompozit) 33
Şekil 14. NIJ standardına göre balistik test sistemi…….…….....……..34
Şekil 15. NIJ standardına göre balistik test sistemi (CES Kompozit).....35
Şekil 16. NIJ kafa formu ve kaskın montajı.....36
Şekil 17. Balistik deneylerde kullanılan 9 mm FMJ.....37
Şekil 18. NIJ balistik testlerde kaskın atış yapılan bölümleri.....38
Şekil 19. Kask ve plakanın sonlu elemanlar modeli ve tehditlerin katı modeli.....40
Şekil 20. Balistik kask ve tutucunun ölçüleri (Tüm ölçüler mm'dir.).....45
Şekil 21. Balistik deneyin sonlu elemanlar kurgusu katı model görünümü.....45
Şekil 22. Balistik deney sonlu elemanlar kurgusu model görünümleri.....46
Şekil 23. Balistik deney düzeneğ7i ve sonlu elemanlar modeli.....47
Şekil 24. 9 mm FMJ ceket ve çekirdeğin sonlu elemanlar modeli.....48
Şekil 25. UHMWPE balistik kaskın sonlu elemanlar modeli.....49
Şekil 26. UHMWPE balistik kaskın sonlu elemanlar modelinin kesit görünümü.....49
Şekil 27. UHMWPE balistik kaskın laminalarının sonlu elemanlar gösterimi….....….50
Şekil 28. 9 mm FMJ malzeme modelleri ve mekanik özellikleri.....51

Şekil 29. Kevlar plakalardaki basınç dağılımının zamanla değişimi.....60
Şekil 30. UHMWPE plakalardaki basınç dağılımının zamanla değişimi.....62
Şekil 31. Kask ve tehdidin birbirlerine göre pozisyonları.....63
Şekil 32. Kevlar ve UHMWPE kaskta oluşan deformasyonlar.....65
Şekil 33. Kevlar ve UHMWPE kaskların balistik darbe etkisi altındaki basınç dağılımının zamana bağlı gösterimi.....67
Şekil 34. Deneysel balistik kask.....69
Şekil 35. Balistik kask ile deney düzeneğinin montajı.....70
Şekil 36. Balistik atış öncesi ve sonrası kaskın görünümü.....71
Şekil 37. Kaska ön taraftan atış yapılması sonrası oluşan balistik deformasyon.....72
Şekil 38. Kaska arka taraftan atış yapılması sonrası oluşan balistik deformasyon.....72
Şekil 39. Kaska sağ taraftan atış yapılması sonrası oluşan balistik deformasyon.....73
Şekil 40. Kaska sol taraftan atış yapılması sonrası oluşan balistik deformasyon.....73
Şekil 41. Kaska üst taraftan atış yapılması sonrası oluşan balistik deformasyon.....74
Şekil 42. Kaskın balistik atışlar sonucunda toplam deformasyonun içten gösterilmesi…….....……75
Şekil 43. 9 mm'lik FMJ'nin balistik darbe sonucu plastik deformasyonu….....…...76
Şekil 44. Kaskın ön tarafına yapılan balistik atışın nümerik incelenmesi…….....…...77
Şekil 45. Kaskın ön tarafına yapılan balistik atışın sebep olduğu travmanın kaskın arkasından görünümü…….....……...78
Şekil 46. Kaskın ön tarafına yapılan balistik atış sonrası oluşan delaminasyon….....….78
Şekil 47. Kaskın ön tarafına yapılan balistik atış sonrası oluşan delaminasyon 2.....79
Şekil 48. Kaskın arka tarafına yapılan balistik atışın nümerik incelenmesi.....80
Şekil 49. Kaskın arka tarafına yapılan balistik atışın sebep olduğu travmanın kaskın arkasından görünümü.....81
Şekil 50. Kaskın arka tarafına yapılan balistik atış sonrası oluşan delaminasyon….....81
Şekil 51. Kaskın arka tarafına yapılan balistik atış sonrası oluşan delaminasyon 2.....82
Şekil 52. Kaskın sol tarafına yapılan balistik atışın nümerik incelenmesi….....…...83
Şekil 53. Kaskın sol tarafına yapılan balistik atışın sebep olduğu travmanın kaskın arkasından görünümü.....…84
Şekil 54. Kaskın sol tarafına yapılan balistik atış sonrası oluşan delaminasyon.....84
Şekil 55. Kaskın sol tarafına yapılan balistik atış sonrası oluşan delaminasyon 2.....85
Şekil 56. Kaskın sağ tarafına yapılan balistik atışın nümerik incelenmesi.....86

Şekil 57. Kaskın sağ tarafına yapılan balistik atışın sebep olduğu travmanın kaskın arkasından görünümü.....87
Şekil 58. Kaskın sağ tarafına yapılan balistik atış sonrası oluşan delaminasyon….....87
Şekil 59. Kaskın sağ tarafına yapılan balistik atış sonrası oluşan delaminasyon 2..……...88
Şekil 60. Kaskın üst tarafına yapılan balistik atışın nümerik incelenmesi……..….89
Şekil 61. Kaskın üst tarafına yapılan balistik atışın sebep olduğu travmanın kaskın arkasından görünümü.....90
Şekil 62. Kaskın üst tarafına yapılan balistik atış sonrası oluşan delaminasyon…….90
Şekil 63. Kaskın üst tarafına yapılan balistik atış sonrası oluşan delaminasyon 2….....91
Şekil 64. Balistik atış sonrası FMJ plastik deformasyonu……..……....92
Şekil 65. Ön taraftan gerçekleştirilen balistik atış sonrası oluşan hasarın deneysel ve nümerik olarak karşılaştırılması.....94
Şekil 66. Arka taraftan gerçekleştirilen balistik atış sonrası oluşan hasarın deneysel ve nümerik olarak karşılaştırılması..……....95
Şekil 67. Sol taraftan gerçekleştirilen balistik atış sonrası oluşan hasarın deneysel ve nümerik olarak karşılaştırılması……...…….....98
Şekil 68. Sağ taraftan gerçekleştirilen balistik atış sonrası oluşan hasarın deneysel ve nümerik olarak karşılaştırılması..……...……...100
Şekil 69. Üst taraftan gerçekleştirilen balistik atış sonrası oluşan hasarın deneysel ve nümerik olarak karşılaştırılması...……...……..102
Şekil 70. Üst taraftan gerçekleştirilen balistik atış sonrası oluşan hasarın deneysel ve nümerik olarak karşılaştırılması.....103

GİRİŞ

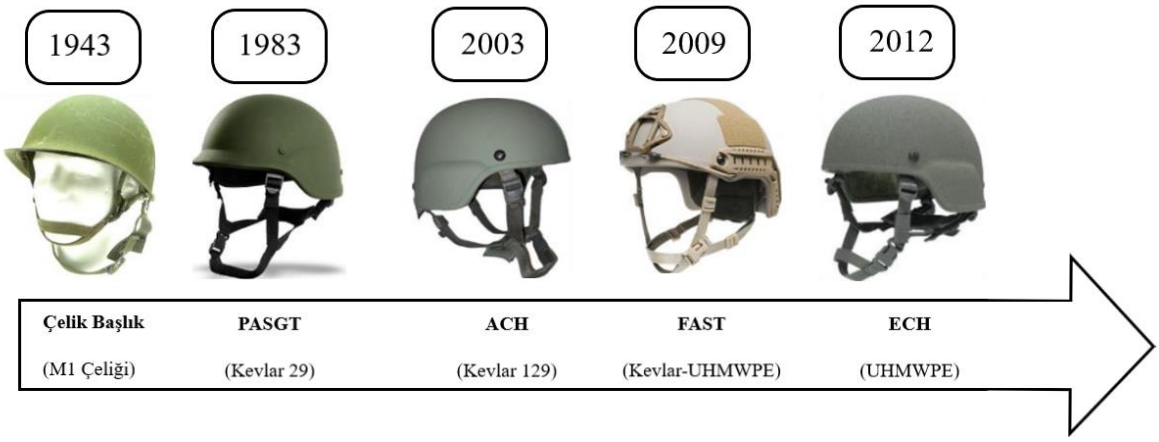
Modern kasklar konvansiyonel savaş durumlarında ve asimetrik askeri çatışmalarda askeri personelin baş bölgesini koruyan giyilebilir bir zırh çeşidi olmakla beraber balistik tehditlere, hızlı parçacıklara ve patlamalara karşı balistik koruma sağlaması gerekmektedir. Modern kasklar yüksek koruma seviyesi, hafiflik ve konforlu kullanım özelliklerinin yanı sıra üzerinde birçok iletişim teknolojisi kullanılabilecek şekilde tasarlanmalıdır. Balistik kask tasarımında malzeme, balistik çarpma mekanizmaları, üretim, performans ve kafa yaralanmalarına karşı koruma gibi kritik konuların ele alınması gerekmektedir. Modern kasklar, balistik koruma olarak kendilerini kanıtlamış ve yüksek dayanımlı, hafif olan kompozit malzemelerden üretilmektedir. Temelde kaskların üretiminde takviye malzemesi olarak iki esas malzeme söz konusudur, bunlar aramid (Kevlar) ve UHMWPE (Ultra High Molecular Weight Polyethylene) fiberleridir [1]. UHMWPE kompozitleri diğer alternatiflerine göre çok daha hafiftir (970 kg/m^3), düşük yoğunluğunun yanı sıra balistik limiti çok yüksektir. Bu özellikleriyle UHMWPE kompozitler balistik sektöründe kişisel balistik koruma ekipmanları, araç zırhları, spall liner (parçacık tutucu), add-on (eklemeli zırh) olarak kendine geniş yer bulmuştur. Geçmişten günümüze birçok balistik kask üretilmiştir. Bu kasklar günümüze kadar çelik (M1), Kevlar 29, Kevlar 49, Kevlar129 kompozitlerinden üretilmekteydi. UHMWPE kompoziti balistik endüstrisinde yüksek performans ve ergonomi gibi avantajları sebebiyle günümüzde çok yaygın kullanılmaktadır.

Hafif kompozit miğfer üretiminde gittikçe artan UHMWPE malzeme kullanımının geleneksel basınç altında kalıplama yöntemleri dışında derin çekme gibi yeni ve daha karmaşık yöntemlere gerek duyulmaktadır. UHMWPE malzemelerin mekanik özelliklerinden en iyi şekilde yararlanmak için daha hassas üretim koşulları

gerekmektedir. Fiberlerin termoplastik olduğu gibi termal hasara karşı duyarlı oldukları bilinmektedir, bunun sonucunda uygun olmayan termal koşullarda fiber yapılarının bozulmasıyla beraber fiberlerin tüm balistik özelliklerini kaybedecekleri anlamına gelir.

İdeal performans için işleme aralığı dar olduğundan, üretim sürecinin kontrol altında kaldığından emin olmak gerekmektedir [2].

Balistik performans anlamında Kevlar veya UHMWPE malzemeleri kendilerini kanıtlamış olsalar dahi geometrik modifikasyonun önemi göz ardı edilmemelidir. Bu sebepten ötürü Kevlar takviyeli plakalar üzerinde balistik çalışmalar yapılmasıyla birlikte, Kevların miğfer formunda da birçok literatür araştırması mevcuttur. Ancak son dönemlerde ortaya çıkmış ve balistik koruma anlamında kendini kanıtlamış olan yüksek dayanımlı polimer fiberlerden oluşan UHMWPE kompozitlerden imal edilmiş bir balistik kaskın uluslararası standartlara (NIJ-0106.01) uygun deneysel anlamda literatür çalışması ve sonlu elemanlar modeli bulunmamaktadır. Bu tez kapsamında üretilen UHMWPE kaskın NIJ-0106.01 standardına göre deneysel balistik atışları gerçekleştirilmiş ve nümerik modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan nümerik model ile balistik kasktaki kompozit hasar, delaminasyonlar incelenmiş ve balistik darbe mekaniği çözümlenmiştir. Bu alanda çalışan tasarımcılar için bir literatür değeri taşıyacak ve yol gösterecektir.



Şekil 1. Balistik kaskların evrimi [1,3]

Geçmişten günümüze balistik kaskların evrimi Şekil 1'de gösterildiği gibidir. UHMWPE kompozitinin zaman içerisindeki alternatiflerinin yerini aldığı görülmektedir.

1. BÖLÜM

GENEL BİLGİLER ve LİTERATÜR ÇALIŞMASI

1.1. Problem Durumu

Baş ve boyun bölgesi bir insanın vücudunun %12'sini kapsamaktadır. Bir tehdidin bu bölgeye isabeti sonucu oluşan travmatik beyin hasarı (TBI) modern çatışmalarda ölüm ve sakatlıkların sebebidir [3]. Savunma ve Gaziler Beyin Hasarı Merkezi (DVBIC) verilerine göre 2000 yılından 2021 yılına kadar 444.328 TBI tespit edilmiştir [4].

Birinci dünya savaşından itibaren balistik tehditlere ve yüksek hızlı fragmanlara (parçacıklara) karşı birçok kask tasarlanmıştır. Yapılan araştırmalara göre ABD askeri gücü 1940'lardan 1970'lerin sonuna kadar M1 çeliğinden yapılan kaskları kullanmıştır. Yüksek oranda sert olan bu başlıklar belli bir oranda balistik koruma sağlayabiliyorlardı ancak bu kasklar aynı zamanda ağır ve rahatsız ediciydi ayrıca künt travmalardan çok az korumaktaydı [3]. Stephanie Kwolek – DuPont firması tarafından patenti alınan Kevlar; yüksek dayanım, hafiflik ve yüksek tokluk özelliklerinden dolayı balistik bir malzeme olarak kullanılmaya başlanmıştır [1].

Kevların kendini balistik olarak kanıtlamasının ardından 1980'lerin ortalarında ilk defa kompozit malzemelerden yapılan kask türü olan PASGT (Personnel Armor System for Ground Troops) ortaya çıkmıştır [3]. PASGT kaskları evrimleşerek üzerine bütünleşmiş iletişim sistemlerinin yerleştirildiği daha hafif MICH (Modular Integrated Communications Helmet) kasklarına dönüşmüşlerdir. 2000'li yıllardan itibaren ise ACH (Advanced Combat Helmet), ABD tarafından birincil kask olarak kullanılmıştır [3]. Son dönemlerde malzeme teknolojisinin gelişmesiyle UHMWPE (ultra-high molecular weight polyethylene) kompozitinin sağlamlık ve ağırlık avantajlarıyla birlikte balistik performansının da çok iyi olması sonucu balistik uygulamalarda yerini almıştır [3]. Termoplastik bazlı UHMWPE yüksek elyaf mukavemeti ve düşük ağırlıkları

sebebiyle askeri zırh uygulamalarında büyük ilgi görmüştür. UHMWPE'nin savaş kasklarında kullanılmaya başlanmasıyla beraber ECH (Enhanced Combat Helmet) kaskları ortaya çıkmış ve yüksek hızlı parçacık koruma oranı Kevlar bazlı gelişmiş bir kask olan ACH'a göre en az %37 daha yüksek olduğu tespit edilmiştir [5]. Bu sebepten ötürü yeni balistik kaskların geliştirilmesi ve mevcut gelişmiş kask sistemlerinin anlaşılması için sayısal çözümlemelerin yapılması gerekmektedir. UHMWPE kaskların henüz bir sayısal çözümlemesi literatürde mevcut değildir. Bu çalışmada UHMWPE kaskların uluslararası standartlara uygun olarak deneysel çalışmaları yapılmış ve sayısal simülasyonlar ile balistik darbe etkisi altındaki davranışı çözümlenmiştir.

1.1.1. Balistik Kompozit Malzemeler

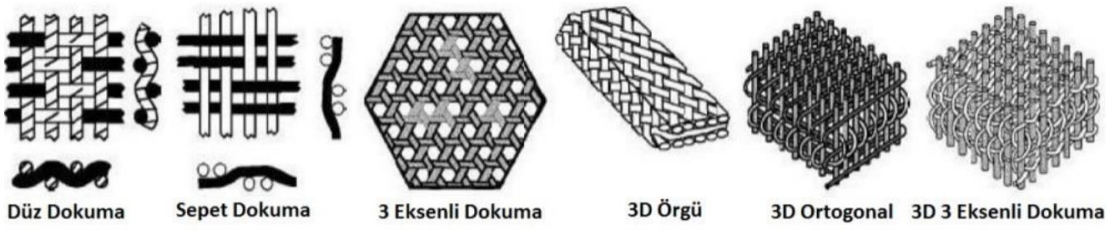
Günümüz teknolojilerinde kompozit malzemelerin kullanımı farklı mühendislik alanlarında giderek artmaktadır. Bu alanlar; savunma, uzay ve havacılık, otomotiv, inşaat sektörleri vb. olarak sıralanabilir. Özellikle polimer kompozitler hafif, güçlü, rijit davranışlarıyla beraber yüksek enerji absorpsiyonlarıyla gelecek teknolojilerde de kendilerine daha fazla yer bulacaktır. Örneğin Şekil 2'de verilen zırhlı araç gövdesi tamamen UHMWPE kompozitinden oluşmaktadır.

Balistik uygulamalarda kompozitler arasında son dönemlerde güçlü mekanik özellikleri, yüksek balistik limitlerine sahip olduğu için en çok UHMWPE kullanılmaktadır [1,3].



Şekil 2. Personel koruma bölgesi tamamen UHMWPE'den elde edilmiş İngiliz zırhlısı SPV 400 [6]

Balistik alanında kullanılan kumaşları örgü ve dokuma kumaşlar olarak ikiye ayırmak mümkündür. Şekil 3'te dokuma ve örgü türleri gösterilmiştir. Örgü kumaşların dokuma kumaşlara göre daha üstün özellikler göstermesine rağmen, karmaşık üretim yöntemleri ve maliyetleri nedeniyle askeri alanlarda genellikle dokuma kumaşlar tercih edilmektedir. Dokuma tiplerinin en yaygın olarak kullanılanları düz ve sepet dokuma türleridir. Sepet dokuma, dokuma karakteristiği sebebiyle düz dokumadan %10 daha fazla enerji emilimi sağlamaktadır.



Şekil 3. Kompozitlerin dokuma örnekleri [7]

Balistik alanında kullanılan kompozitlerin, metal ve seramik gibi materyallerin yerini almasında en büyük etkenleri hafif olmaları, ağırlığına oranla performanslarının daha yüksek olması ve kullanıcıların hareket kabiliyetlerini sınırlamaması olarak sayabiliriz. En çok tercih edilen kumaş türleri ise, aramid ve para-aramid kumaşlar, ultra yüksek molekül ağırlıklı polietilen (UHMWPE), PBO ve PPID kumaşlardır [7].

1.1.1.1. Aramid Lifler (Kevlar)

"Aromatik poliamid"den türetilen “Aramid”, kimyasal olarak "poli para fenilen terepitelamid" olarak tanımlanır. Bu nedenle “para-aramid” olarak da adlandırılır. Üretim sürecine bağlı olarak meta aramid kumaşlar da mevcuttur. Bu kumaşlar ise genellikle ısı mukavemeti istenen, tutuşma istenmeyen durum ve malzemelerde kullanılmaktadır. En yaygın kullanılan aramid türleri Nomex (Dupont), Conex (Teijin)’dir. Aramid kumaşların balistik uygulamalarda kullanılan türleri ise para aramid fiberlerdir. Özellikle kevlar balistik alanında kişisel elbise, bot üretiminde gelişmiş kompozit üretiminde yoğun bir şekilde kullanılmakta ve yüksek mekanik özellikleri ile bilinmektedir.

Aramid lifler ilk etapta zayıf mekanik özelliklere sahip plastiklerin güçlendirilmesi için üretilmiştir. Yüksek mukavemet özellikleri bu kumaşlara uzay teknolojileri, otomotiv, savunma sanayi ve havacılık alanlarında da yer bulmasına katkı sağlamıştır.

Merminin kumaşa teması ile iplikler arasında oluşan kaymalar veya ipliklerin bu darbeye karşı koyabilme kapasitesi balistik performansta önemli yer tutmaktadır [7].

Kevlardan yapılan yumuşak bir zırh örneğinin atış sonrası görünümü Şekil 4’te gösterildiği gibidir.



Şekil 4. Balistik kevlar kumaş atış sonrası örnek gösterimi [7]

1.1.1.2. Yüksek Performanslı Polietilenler (HPPE ve UHMWPE)

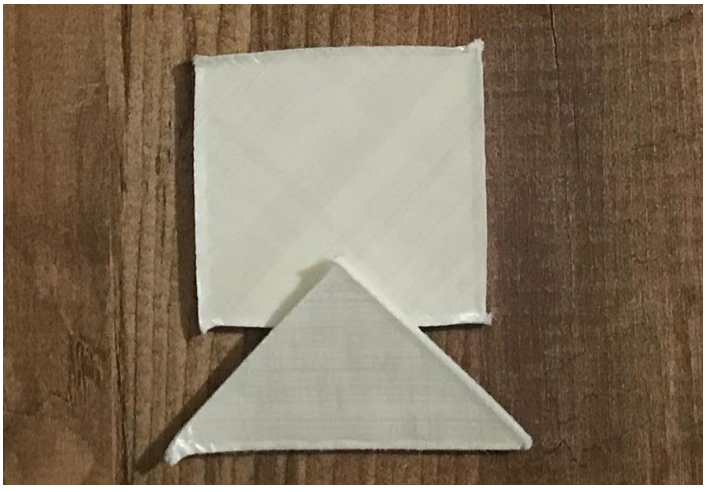
UHMWPE elyafı, son derece uzun polietilen zincirlerinden oluşan poliolefin ailesindeki termoplastik bir elyaftır. İlk olarak 1970'lerin sonlarında DSM® (Hollanda) tarafından bir jel eğirme işlemi kullanılarak üretilmiştir. UHMWPE, çok yüksek bir paralel yönelim yüzdesine ve yüksek düzeyde kristalliğe sahiptir.

Ultra Yüksek Moleküler Ağırlıklı Polietilenler (UHMWPE), piyasada Spectra ve Dyneema isimleriyle bilinir. Yüksek moleküler ağırlıklı polietilenler 1 g/cm³ den daha küçük (ortalama 0.97 – 0.98 g/cm³) yoğunluklarıyla zırh sanayinde kullanılan en hafif malzemelerdir. UHMWPE, genellikle UD yapılıdır. UD yapılı kompozitler balistik darbe etkisi altında kinetik enerji absorpsiyonu çok iyidir. Ancak UD kompozitlerin delaminasyon oranı diğer örgü tiplerinden daha fazladır. UHMWPE HB26 kompoziti UD yapıda kullanılır ve yapı olarak SK76 fiber / poliüretan matris kullanır. Reçine oranı %20 civarındadır. SK76 fiberleri 17 µm çapındadır. UHMWPE kompozitinin alansal yoğunluğu 0.145 kg/m^2'dir [8]. UHMWPE'nin moleküler bağı van der Waals bağlarıdır. Çok uzun moleküler zincirlerden oluşan UHMWPE, Hidrojen bağlarıyla birbirine tutunmuş Kevlar'dan çok daha yüksek kuvvet iletimi yapar [9]. Ticari UHMWPE elyafı Amerika Birleşik Devletleri'ne ilk olarak 1980'lerde Allied Signals tarafından tanıtılmıştır. Şu anda UHMWPE elyafı, Dyneema® markasıyla DSM® (Greenville,

Kuzey Carolina) tarafından ve Spectra® markasıyla Honeywell (Colonial Heights, Virginia) tarafından üretilmektedir. UHMWPE elyafı, elyafın uzunlamasına yönündeki çok güçlü C-C bağı ve elyafın radyal yönündeki zayıf van der Waals etkileşimleri nedeniyle son derece yüksek tokluk ve yüksek darbe mukavemeti ile zırh endüstrisinin vazgeçilmezi olmuştur. UHMWPE molekül ağırlığına oranla çelikte 15 kat, kevlardan ise % 40 daha güçlüdür. Aşınma dayanımı, yüksek karbonlu çelikten daha yüksektir. UV ışınlarına ve suya karşı dayanıklıdır. UHMWPE ve polimer matris olarak izopren latex kullandığı çalışmasında kurşun geçirmez yelek üretmiş ve 7.62 mm'lik meriler karşısında balistik testlerini gerçekleştirmiştir. Testler sonucunda mermilerin zırhın arka yüzeyine geçmediği belirtilmiştir [7].

UHMWPE fiberler yüksek modülleri, yüksek akma gerilimleri ve düşük yoğunlukları sebebiyle sadece personel zırhlarında değil, zırhlı araçlarda da yoğun bir şekilde kullanılmaktadır. UHMWPE elyaf takviyeli polimer matris kompozitler, vücut zırhı, savaş kaskı ve araç zırhında balistik ve patlama koruması için kullanılmaktadır [3,7]. UHMWPE Prepreg örneği Şekil 5'te gösterildiği gibidir.

UHMWPE, askeri personel koruma zırhı olarak göğüs plakası, balistik kask olarak hafifliği ve yüksek balistik limiti sebebiyle kullanılsa da zırhlı araçlarda spall liner, add on gibi eklemeli ve hibrit zırhlarda da yaygın bir biçimde kullanılmaktadır [10]. En zorlu kinetik enerjili ve kimyasal enerjili mühimmatlara karşın oldukça etkili bir performans göstermektedir.



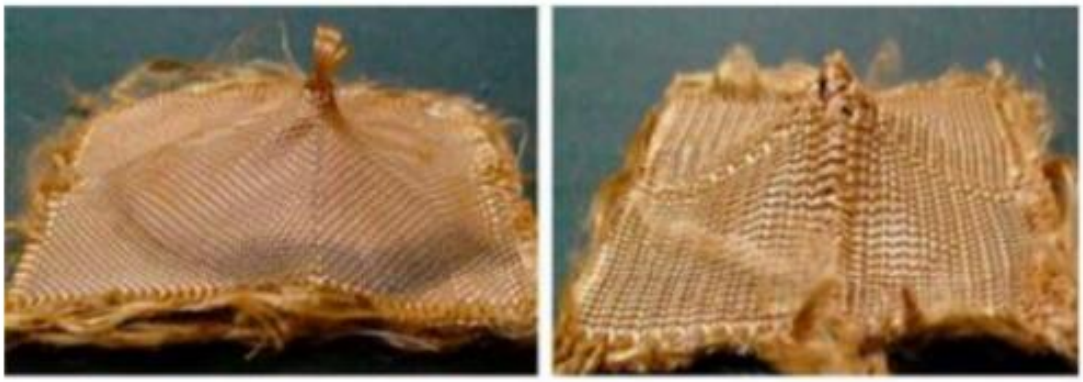
Şekil 5. UHMWPE prepreg örneği

1.1.1.3. PBO (Polybenzobisoxazole) Kumaşlar

PBO (Polybenzobisoxazole), halkalı aromatik yapılar içeren polybenzazoles türlerinden biridir. 1980'li yıllarda Amerika Hava Kuvvetlerinin aramid liflerden daha dayanıklı malzeme üretme çabalarının bir sonucu olarak ortaya çıkmıştır Piyasada Toyobo firmasının ticari ismi olan Zylon ismiyle bilinmektedir [7]. Balistik performans göstermiş bir PBO kumaşın atış sonrası görünümü Şekil 6'da verildiği gibidir.

PBO'nun aromatik yapısı PBO liflerinin genel özellikleri;

- Yüksek bozulma sıcaklığı,
- Yüksek aşınma direnci,
- Düşük nem direncidir,
- Yüksek sürünme direnci,
- Düşük ultraviyole direnci.



Şekil 6. PBO balistik kumaşlara balistik atış sonrası örnek [7]

1.1.1.4. Yüksek Performanslı Cam Lifler (GFRP)

Cam lifi, ince yapısı, yüksek termal kararlılığa sahip oluşu, suya karşı dayanıklılığı ve yüksek direnç özellikleri sayesinde tekstil ve plastik sektörleri başta olmak üzere birçok sektörde farklı yöntemlerle değişik amaçlar için kullanılmaktadır. Dokuma cam kumaşların üretilmesinde, hammadde halinde bulunan cam lifine üç aşamalı sıcaklık

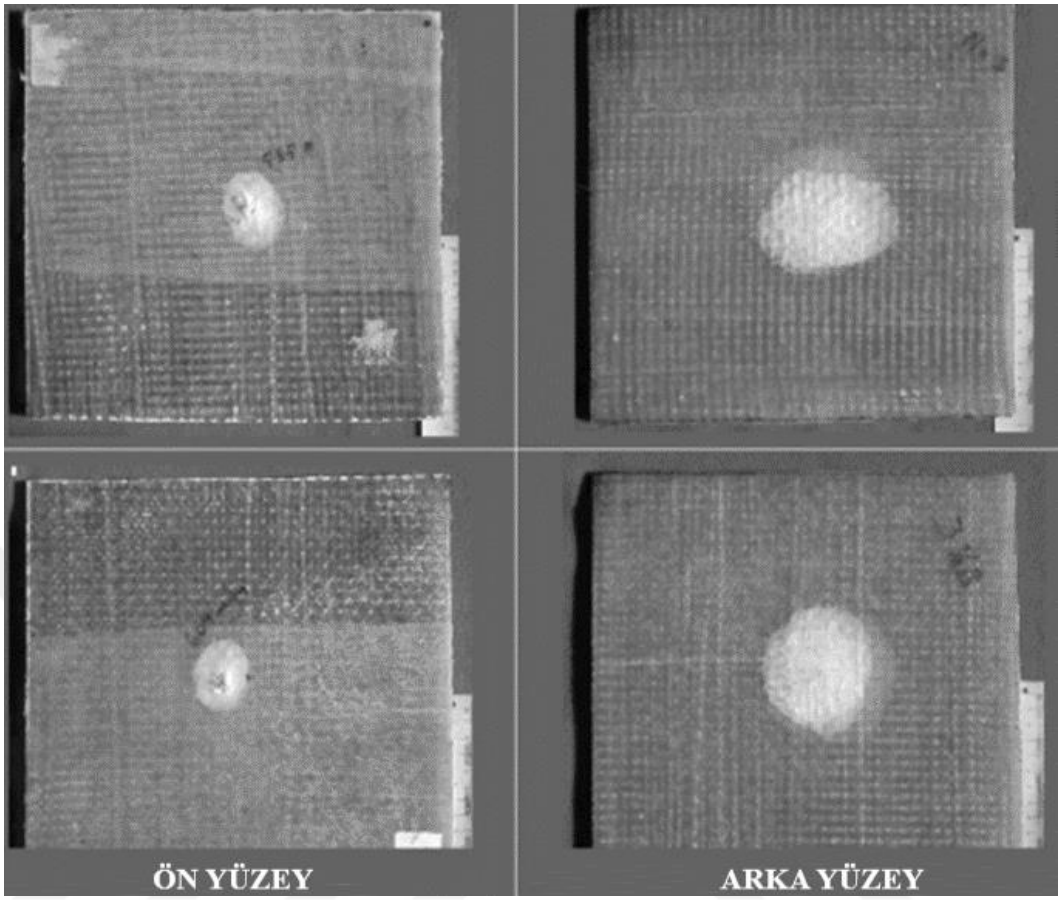
uygulanır. 1370ºC'den 1260 ºC'ye kadar su vasıtasıyla soğutulan hammadde daha yoğun bir kıvama gelir ve üretim yöntemine göre dokuma, toz, kırpılmış veya iplik şeklinde elde edilir.

Farklı türleri olan cam lifleri; yüksek dayanımları, kolay işlenebilir olmaları ve düşük yoğunlukları sebebiyle en çok kullanılan türleri E (Electrical)-cam ve S (Strength)-camdır. S-cam ve E-cam askeri birçok uygulamada kullanılan güçlendirilmiş liflerdir. S-camın maliyeti E-cam ile kıyaslandığında yüksek olsa da yüksek dayanımı ve düşük yoğunluğu sebebiyle balistik uygulamalarda sıklıkla kullanılır. S-cam yüksek oranda yorulma dayanımına ve neme karşı yüksek direnci sahiptir. Buna karşın sürünme oranı düşüktür. S-camın çekme mukavemeti E-camına oranla %33 daha yüksektir. Cam lifleri genel amaçlar için ve özel amaçlar için olmak üzere iki kategoriye ayrılmaktadır. Endüstride kullanılan cam liflerinin %90'ından fazlası genel amaçlar için kullanılan düşük maliyetli cam lifleridir. Bu lifler ASM'de (American Society for Metals) E- glass olarak tanımlanmış ve karakteristik özellikleri belirtilmiştir [7].

Cam liflerinin ASM'de belirtilen genel özellikleri aşağıdaki gibidir;

- Düşük maliyetli olması,
- Yüksek üretim oranları,
- Yüksek sertlik,
- Isıya karşı direnç,
- Kimyasallara karşı direnç,
- Yüksek direnç,
- İyi elektrik izolasyonu

Termal özelliklerinin iyi olması nedeniyle yanmaz kablo üretiminde de kullanılmaktadır [7,11]. Yüksek mekanik özellikleri ve balistik performansları sebebiyle savunma endüstrisinde de yaygın olarak kullanılmaktadır. Balistik atış yapılmış bir cam fiber kompozitinin kurşunu durdurduktan sonraki görseli Şekil 7'de verilmiştir.



Şekil 7. Cam fiberlerin balistik atış sonrası örneği [11]

1.1.1.5. PPID (Polypyridobisimidazole) Lifleri

Akzo Nobel tarafından geliştirilen ve M5 olarak bilinen PPID (Polypyridobisimidazole) lif grubu, yüksek balistik performansa sahiptir. PPID lifleri PBO lifleri gibi son zamanlarda yaygın olarak kullanılan yüksek çekme gerilmesi, yüksek elastisite modülü ve yüksek elektriksel iletkenliğe sahip lif grubudur. PPID lifleri üzerine son zamanlarda yapılan çalışma sayısında artışlar görülmektedir. Özellikle 2000'li yıllardan sonra yapılan çalışmaların sonucunda kumaş, kâğıt ve yangın geciktirici özellikleri ile ilgili alınmış birçok patent çalışması mevcuttur [7].

1.1.2. Balistik

Balistik genel anlamda, fişeğin ateşlenmesi ile mermi çekirdeğinin namludan çıkıp hedefe ulaşmasına kadar olan hareketlerini, hedef üzerindeki tahribatını ve mermi çekirdeğinin bu hareketine etki eden faktörleri inceleyen bilimdir. Balistik; iç balistik, dış balistik ve terminal balistiği olmak üzere üç ana disipline ayrılmıştır [12].

1.1.2.1.İç Balistik

İç balistik, mermi çekirdeğinin namlu içerisindeki hareketlerini ve bu hareketlere etki eden faktörleri inceler veya ateşleme yapıldıktan sonra silah namlusu içerisinde neler olduğunu, silahın tetiği çekildikten sonra mermi çekirdeğinin namluyu terk edinceye kadar geçen süre içerisinde kovan ve mermi çekirdeğinin durumunu inceler şeklinde tanımlanmaktadır. Saniyenin onda birinden daha kısa bir süre içerisinde gerçekleşen balistiğin bu bölümü; ateşli silah, fişek, fişeğin ateşlenmesi, ateşleme iğnesinin vuruşu, kapsülün yapısı, kapsülün ateşlenmesi, barutun yapısı ve yanma hızı, ses seviyesi ve etkisi, namlu yapısı ve boyutları, namluda bulunan setlerin yapısı ve set sayısı ile ilgilenir [12].

1.1.2.2. Dış Balistik

Dış balistik, mermi çekirdeğinin namluyu terk ettiği andan hedefe ulaştığı ana kadar geçen zaman içerisindeki hareketlerini etkileyen faktörleri inceler veya mermi çekirdeğinin, namludan çıktıktan sonra hedefe varıncaya kadar geçen süre içerisinde havanın direnci, mermi çekirdeğinin yer çekimi etkisinde kalması, yere düşüşü, sürüklenişi ve dengesi ile ilgilenir. Fişeğin ateşlenmesinden sonra kovan içerisindeki gazın genişlemesiyle ortaya çıkan enerji, mermi çekirdeğine sıcaklık ve hareket olarak transfer edilerek çekirdeğin namluda ivme kazanmasını sağlar ve mermi çekirdeği namludan çıktıktan sonra kazandığı yüksek hızla havada hareket etmeye başlar. Mermi çekirdeğinin namlu ağzından hedefe varıncaya kadar hareketinde çizdiği yola "mermi çekirdeği yolu" denir ve mermi çekirdeğine uçuş esnasında tesir eden rüzgâr, sıcaklık gibi dış etkiler yardımı ile tespit edilir [12].

1.1.2.3. Terminal Balistik

Mermi çekirdeğinin hedefe çarptıktan, duruncaya kadar yaptığı; delme gücü enerjisini çarptığı cisme iletmesi gibi etkilerle ilgilenir. Mermi çekirdeğinin hedefe çarpması sonucu kaybolan kinetik enerji miktarı esas olarak 4 faktöre bağlıdır.

1) Hedefe çarpma esnasında mermi çekirdeğinin sahip olduğu enerji: Bu mermi çekirdeğinin kütlesi ve hızına bağlıdır.

2) Hedefe çarpma esnasında mermi çekirdeğinin yalpalama açısının değeri: Mermi çekirdeği namludan hızla çıkarken yivlere sürtünmesi nedeniyle jiroskopik bir dönüşe sahip olur. Bu sırada bir yalpalama da başlar sonra düzelir ve dönüş değeri azaldıkça yalpalama çoğalır. Bu yalpalama mermi çekirdeğinin uzunluğuna, çapına, kesitsel yoğunluğuna, yivlerin dönüş derecesine, hava yoğunluğuna bağlı olarak farklı değerlerde meydana gelebilir.

3) Mermi çekirdeğinin kalibresi, şekli, yapısı: Küt uçlu mermi çekirdekleri, sivri uçlu olanlara göre hedef tarafından daha fazla engellenir dolayısıyla daha fazla enerji kaybederler. Yumuşak uçlu ve çukur (gömleksiz, yarı gömlekli) mermi çekirdekleri hedef içerisine girerken genişleme eğiliminde olup daha fazla enerji kaybederler.

4) Mermi çekirdeğinin çarptığı hedefin yoğunluğu, sertliği ve elastikiyeti: Yoğunluğu yüksek olan hedef, mermi çekirdeği geçişine daha fazla direnir ve çekirdeğin enerji kaybı daha fazla olur [12,13].

1.1.3. Penetrasyon Mekaniği

Kinetik enerji penetrasyonu genel olarak yüksek hızlı darbe uygulamalarında incelenen bir konudur. Özellikle balistik darbe analizlerinde yer alır ve mermi ile hedef arasında darbe süresince oluşan olaylar incelenir.

Kavramsal olarak penetrasyon (nüfuziyet) merminin hedef içine kısmen girmesi, yani hedef içinde durmasıdır. Uygun bir zırh tasarımının elde edilmesini amaçlayan bir çalışmanın temel dayanak noktası da budur. Perforasyon (delinme) ise hedefin kalınlığı boyunca merminin ilerlemesi, yani merminin hedefi tamamıyla delip geçmesi olarak tanımlanır. Merminin hedef ile penetrasyonu veya perforasyonu hareketinden kaynaklanan kinetik enerjisi sayesinde gerçekleşir. Bu nokta kinetik enerji çarpışmalarını, kimyasal enerji boşalımlarından ayırır.

Merminin hedefe çarptığı andan itibaren hem mermi de hem de hedef cisimde gerilme dalgaları oluşur. Bu gerilme dalgaları çarpma hızı ve malzeme özelliklerine bağlı olarak sesin malzeme içindeki hızında ya da daha yüksek hızlarda hareket ederler. Bunları daha yavaş hızlara sahip olan kayma dalgaları izler. Yüksek çarpma hızlarında, mermide, serbest yüzeye bağlı olarak dik çarpmalarda iki boyutlu, açılı çarpmalarda ise üç boyutlu

gerilme durumu yaratan gevşeme (relief) dalgaları oluşur. Bunun sonucunda, sınır şartlarından dolayı basma yönündeki gerilme dalgaları çekme yönüne döner. Yüksek hızlarda bu dalgaların etkisi düşük hızlardakine oranla daha fazladır.

Eğer uzun, silindirik bir cisim balistik limitin altında bir hızla hedef yüzeye çarparsa eğilmeye başlar. Çarpma hızı arttıkça, plastik deformasyon belirli bir bölgede yoğunlaşır ve silindirin uç kısmı hedefi delemeden mantar şeklinde deformasyona uğrar. Çarpma daha yüksek bir hızda gerçekleşirse plastik deformasyona ek olarak silindir hedef içine gömülür.

Balistik limitin üzerindeki çarpmalarda penetrasyon, çarpma ile eş zamanlı olarak başlar. Çarpmanın ilk anında, yüzeyler arası basınç hem hedef hem de merminin malzeme mukavemetinin çok üzerinde olacağından, merminin ucunda erozyonla birlikte penetrasyon oluşurken, merminin geri kalan kısmı herhangi bir deformasyona uğramadan oluşan kraterde yol alır. Krater giderek derinleşirken, dip kısmı merminin ucundaki deformasyona uygun tarzda genişler ve temas yüzeyinde yüksek kayma gerilmeleri oluşur. Belirli bir zaman sonra malzeme özellikleri, çarpma hızı ve hedefin kalınlığına bağlı olarak hedefin arka yüzeyinde şişme (bulging) ve yayılma şeklinde şekil değişiklikleri meydana gelir. Balistik penetrasyon ve perforasyon süresince mermi ve hedef, temas yüzeylerinden başlamak üzere eşit ve zıt yönde kuvvetlere maruz kalırlar. Ara yüzeyden itibaren yayılan dalgalar mermi ve hedefin içindeki gerilme ve yer değiştirmeleri biçimlendirir ve durumlarında değişikliklere neden olurlar. Mermi; hızının belli bir miktarını kaybeder, yörüngesinde değişiklikler olur, deforme olabilir, erozyona bağlı olarak ağırlığının bir kısmını kaybedebilir, değişik boyutlarda parçacıkların hedeften kopmasına neden olabilir. Balistik darbe sonucunda, mermi ve zırh malzemeleri için çeşitli hasar mekanizmaları ortaya çıkmaktadır.

Özellikle sert metaller ve seramik gibi malzemelerde, yüksek basınç yükü nedeniyle dinamik hasar görülmektedir. Balistik darbe analizlerinde, zırh sisteminin mekanik özelliklerinin bilinmesinin yanı sıra, darbe etkisini oluşturan mermi veya penetratörün de özelliklerinin iyi bilinmesi gerekir. Çünkü mermi türüne göre oluşacak darbe etkileri farklılıklar gösterir. Gelişen teknoloji ile farklı silahlar için hız, geometrik şekil, çekirdek yapısı gibi özellikleri birbirinden çok farklı mermi türleri geliştirilmiştir. Bu yüzden

balistik zırhların tasarımında darbeyi oluşturacak olan merminin de özellikleri dikkate alınmalıdır.

Zırh tasarımda, mermi için dikkat edilmesi gereken başlıca özellikler şunlardır:

- Mermi çekirdeğinin malzemesi (çelik, demir, kurşun, vb.)

- Mermi uç geometrisi (sivri, küt, vs.)

- Çekirdek ağırlığı

- Mermi hızı

- Mermi uç geometrisi ve hızı oluşabilecek penetrasyon veya perforasyon olaylarını oldukça önemli derecede etkilemektedir [12,13].

1.1.4. Hasar Modları

Balistik darbe altında, bir hedefe nufüz eden bir mermi, malzemeyi, hasara neden olan karmaşık bir gerilme durumuna maruz bırakır. Malzemelerde bozukluğa sebep olan bu hasar mekanizmaları, hedef ve merminin malzeme özelliklerine, geometrik şekillerine, boyutlarına ve mermi çarpma hızına bağlı olarak değişmektedir. Balistik darbe sırasında en çok karşılaşılan hasar mekanizmaları aşağıda tanımlanmıştır.

Sünek delik genişlemesi (ductile hole enlargement): Darbe impulsu, hedef malzemenin çevresel dinamik kayma gerilmesini aşarak mermi çapından daha büyük bir krater oluşturmak için darbe yüzeyini dışarı doğru ittiğinde ortaya çıkan hasar durumudur.

Tapalaşma (plugging): Hedef malzemenin enine kayma özellikleri tarafından kontrol edilen bir olaydır. Bu hasar mekanizmasına, penetre olan hedef etrafında üretilen büyük kaymalar sebep olur. Kayma deformasyonu tarafından üretilen ısı, aynı zamanda adyabatik kesme olarak bilinen anlık olarak malzeme mukavemetini azaltan dar bir halka oluşumu ile sınırlandırıldığında bu hasar meydana gelir.

Yapraklanma (petalling): Merminin ilk olarak plakaya değdiği anda meydana gelen ilk gerilme dalgası geçtikten sonraki yüksek radyal ve çevresel çekme gerilmeleri ile oluşur.

Bu hasara, hedefin düzlemsel zayıflığı veya homojen olmaması ve hedef malzemesinin hareketi tarafından oluşan eğilme momentleri sebep olur.

Ayrılma (delamination): Bu hasar büyük ölçüde ortotropik katılarda, katmanlı plakalarda ve tabakalı kompozitlerde görülür. Bu hasara neden olan asıl sebep, balistik darbe sonrası katmanlar veya tabakalar arası yüksek gerilme durumlarının ortaya çıkmasıdır. Hedef malzemesine karşı mermi burun şekline bakılmaksızın oluşabilir.

Yüzey Çatlaması (spalling): Mermi ile hedef plakanın çarpışma noktasında üretilen kuvvetli basma gerilmesi dalgalarının bir sonucu olarak ortaya çıkar. Bu basma dalgaları, hedefin serbest yüzeyinden çekme dalgaları olarak yansır ve gelen basma dalgaları ile etkileşime girer. Eğer bu etkileşimin büyüklüğü, hedef malzemesinin kalınlığı boyunca çekme mukavemetinden büyükse, yüzey çatlama hasarı görülür. *Ufalanma (comminution):* Genel olarak ufalanma terimi, katı malzemelerin bir parçacık boyutundan başka bir parçacık boyutuna, parçalanma, kesme titreşim ya da diğer işlemler yoluyla indirgenmesi anlamına gelir. Terminal balistikte bu kırılma olayı, seramik, beton gibi kırılgan malzemelerde görülür. Bu hasar türünde, balistik darbe sırasında hedef plakada merminin değdiği yerde konik kırığın içinde kalan ufalanmış bir bölge oluşur.

Konik kırılma (Conoidal fructure): Gevrek bir malzemeye, küt veya kör uçlu bir mermi tarafından balistik darbe uygulandığında, yerel çekme gerilmesi altındaki yüzeysel bir kusur, temas yüzeyleri etrafında bir koni çatlağı geliştirir. Sonrasında mermi momentumu, malzemenin kalınlığı boyunca hızla ilerler ve tamamen plakadan ayrılmış bu koni çatlağını kesip atar. Hedeflerde kalınlık boyunca meydana gelen bu hasar, cam ve seramiğin yanı sıra yüksek sertlikteki çeliklerde de görülmektedir.

Radyal kırılma (radial fructure): İlk gerilme dalgasını takip eden radyal kırılma hasarı, hedefin genelde ön tarafında meydana gelir. Radyal kırılmaya, balistik darbe noktası etrafında gelişen çevresel bir gerilmenin oluşması sebep olur. Bu hasar biçimi, çekme dayanımı basma dayanımından daha düşük olan seramik gibi kırılgan hedef malzemelerinde sıklıkla görülür.

Çevresel çatlama (Circumferential cracking): Radyal çatlakların gelişiminden sonra meydana gelen çevresel çatlama hasarı, sert yüzlü hedef sistemlerinde görülür. Bu tür malzemelerde, balistik darbe sırasında mermi önündeki destek malzemesi geriye doğru

itilir ve bu da her katmanın radyal ekseni boyunca eğilme momenti oluşturur. Sonrasında seramikteki kırılma tokluğu ve yüzey kusurlarının varlığı ile bu hasar meydana gelir [13].

1.1.5. Alansal Yoğunluk

Zırh sistemlerinin yeterince hafif olup olmadığı değerlendirilirken sistemin mutlak ağırlığı üzerinden değerlendirilemez. Bunun yerine, zırh belli bir alanı koruduğundan dolayı pratik ağırlığı en iyi alansal yoğunluk ile tanımlanabilir. Alansal yoğunluk,

$$A_d = \frac{zırh\ ağırlığı}{koruma\ alanı}\frac{kg}{m^2} \tag{1}$$

eşitliği ile ifade edilir. Zırhın alansal yoğunluğu, zırhın fiziksel bir özelliğidir ve tek başına bir zırhın balistik olarak etkili olup olmadığını göstermez. Ancak, alansal yoğunluk, zırh malzemesinin enerji emme kapasitesinin bir ölçüsüdür. Temel olarak alansal yoğunluk, bir zırh sistemini balistik özellikleri bilinen başka bir zırhla karşılaştırarak, hafiflik bakımından zırh sisteminin verimliliğini tespit etmede kullanılır. Bir zırh sisteminin verimliliği E_m, kütlesel verimlilik olarak da adlandırılır ve belirli bir mermiye karşı tank zırhı olarak kullanılan haddelenmiş homojen çelik zırhın (RHA) alansal yoğunluğunun, aynı mermiye karşı zırh sisteminin alansal yoğunluğuna oranı ile tespit edilir. Kütlesel verimlilik;

$$E_m(zırh\ sistemi) = \frac{A_d}{A_d}\frac{(RHA)}{(Zırh\ Sistemi)} \tag{2}$$

eşitliği ile hesaplanır. Bu eşitlik, aslında zırh sisteminin belirli bir mermiye karşı ne kadar etkili olduğunu ve genel olarak sistemin hafif olup olmadığını gösterir. Yani E_m değeri ne kadar yüksek olursa, zırh sisteminin ağırlığı da o kadar düşük olur. Örnek olarak, hafif seramik sistemler için E_m değeri 5-10 gibi yüksek değerler olabilir [13].

1.1.6. Balistik Limit

Balistik limit kavramı için literatürde farklı yaklaşımlar mevcuttur ve bu yaklaşımları tanımlamak gerekir. Balistik limit hızı V_{bl}, merminin hedefe tamamen nüfuz edemediği hız ve bu hızın altındaki hızlar olarak tanımlanmıştır. Bu yaklaşımlar arasındaki temel fark perforasyon olayının tanımlanmasındaki farklı kriterlerdir. Balistik limit hızının belirlenmesindeki gerçek değerlendirme istatiksel çalışmalara dayalı olan testlerle yapılır.

Balistik limit hızı V_{50} ile gösterilir ve bu hız merminin hedefe dik konumda çarpması sonucu hedefin %50' sini delme kapasitesine sahip olduğu hızdır. Bahsedildiği gibi V_{50} hızının tespitinde istatiksel yaklaşımlardan faydalanılır. Temel olarak, tam nüfuziyete sebep olan en düşük üç hız ile kısmi nüfuziyete sebep olan en yüksek üç hızın ortalaması alınarak balistik limit hızı tespit edilir. Deney sonuçlarında hedefi delip geçen en düşük hız ve delip geçmeyen en yüksek hız arasındaki fark ne kadar az ise balistik limit tahmininin doğruluğu o kadar yüksek demektir.

Balistik limit kavramı üzerine diğer bir yaklaşım da Lambert-Jonas yaklaşımıdır.

$$v_{res} = a\,({v_{imp}}^{p} - {v_{bl}}^{p})^{1/p} \tag{3}$$

$$v_{imp} > v_{bl}$$

Burada, v_{imp} merminin çarpma hızını, v_{res} merminin plakayı deldikten sonra kalan artık hızı ve v_{bl} balistik limit hızını göstermektedir. a ve p deneysel verilerden elde edilen katsayılar olup, $p = 2$ olduğu zaman eşitlik Recht-Ipson yaklaşımı adını almaktadır.

$$v_{res} = a\,({v_{imp}}^{2} - {v_{bl}}^{2})^{1/2} \tag{4}$$

$$a = \frac{M}{(M+m)} \tag{5}$$

a katsayısının bulunmasında kullanılan M merminin kütlesini ve m ise çarpışma ile mermiden kopan parçanın kütlesini göstermektedir. Lambert-Jonas eşitliğine göre balistik limit eğrisi çizildiğinde yatay eksen çarpma hızını, düşey eksen ise artık hızı göstermektedir. Eğrinin yatay ekseni kestiği nokta balistik limit hızını vermektedir. Yani v_{res}=0 olduğunda çarpma hızı v_{imp}, balistik limit hızı v_{bl}' e eşit olur.

Yüksek hızlı çarpışma olayını diyagramlar yardımıyla göstermek sistemin anlaşılması bakımından daha faydalı olmaktadır. Bu diyagramlar oluşturulurken hız, hedef kalınlığı, çarpma açısı, çarpma kinetik enerjisi, itme, kuvvet ve zaman gibi etkiler dikkate alınmaktadır. Balistik limit, mermi ve zırh performansının tespitinde temel parametredir [12].

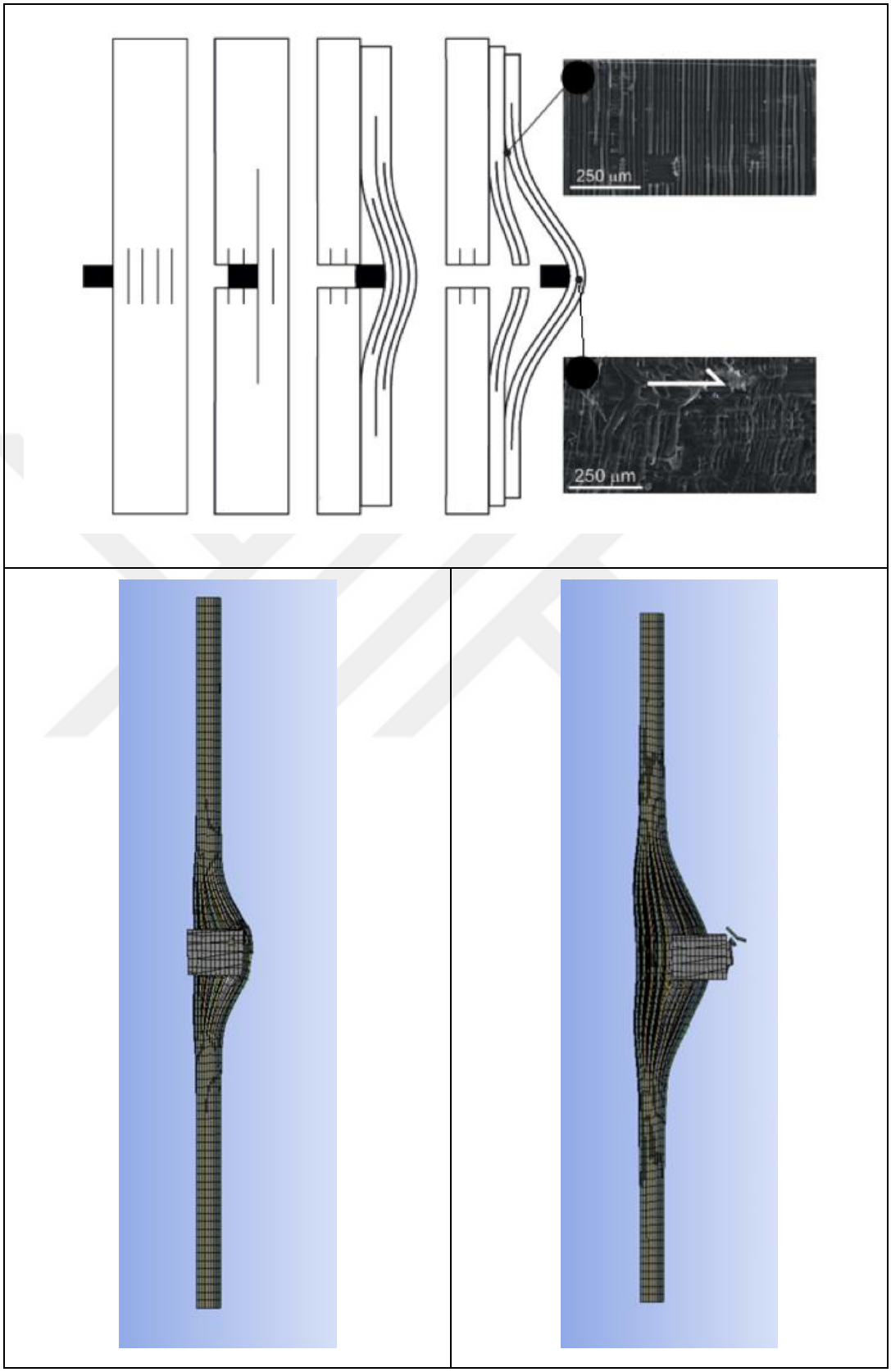
1.1.7. Kompozit Plakaların Balistik Hasarı

Kompozit malzemeler, genellikle farklı malzeme türlerinin bir araya getirilmesiyle oluşturulan dayanıklı ve hafif malzemelerdir. Bu malzemeler genellikle metal matrisli kompozitler veya polimer matrisli kompozitler olarak sınıflandırılır.

Balistik darbe hasarı genellikle kompozit malzemenin iç yapısına, tabakalar arasındaki bağlantılara ve malzeme kombinasyonuna bağlı olarak değişir. Metal matrisli kompozitlerde, metal matris genellikle darbeyi dağıtmaya ve enerjiyi absorbe etmeye yardımcı olur. Ancak, bu tür malzemelerde de çatlaklar veya delikler oluşabilir.

Polimer matrisli kompozitlerde ise polimer matris, esneklik ve enerji absorpsiyonu sağlar, ancak aynı zamanda darbe enerjisinin bir kısmını emer. Balistik darbe hasarıyla başa çıkmak için mühendislikte çeşitli stratejiler kullanılır. Balistik testler ve simülasyonlar, malzemenin performansını değerlendirmek ve iyileştirmek için yaygın olarak kullanılır.

Kompozitlerin balistik etki altında davranışı son derece karmaşıktır. Delaminasyonlar matris kırılmaları, fiber kırılmaları, kayma kırılmaları ve yüzey fiber hasarları balistik etki altında aynı anda olur. Nümerik metot ile makro mekanik karmaşık problemler çözümlenmeye çalışılır. Kompozit bir plakada oluşan temsili verilmiş ve deneysel fiber kırılmaları gösterilmiş görsel, nümerik örnek gösterimle beraber Şekil 8’de sunulmuştur.



Şekil 8. Balistik darbe etkisi altında kompozit laminelerin davranışı [14] ve örnek çalışma simülasyonu

Balistik darbe etkisi ile artan yapısal ilişkilerde, delaminasyonun, matris malzemesindeki kalınlık boyunca çekme gerilmeleri ve/veya aşırı kesme gerilmelerden kaynaklandığı varsayılır. Kompozitler balistik darbe hızına, enerjiye, temas süresine bağlı olarak ilk fiberler kırılırken ardı laminalarda ayrışmalar meydana gelir. Bu durum delaminasyona sebep olur. En son laminanın da ayrılıp, yırtılmasıyla penetrasyon gerçekleşmiş olur.

1.1.8. Balistik Darbe Mekanizmaları

Balistik miğfer veya zırh tasarımı yaparken yapının darbe yüklemeleri altındaki davranışını, balistik mekanizmalarını anlamak ve çözümlemek oldukça önemlidir. Balistik bir miğfer tasarımında bu mekanizmaları anlamak için kullanılan dört metot vardır. Bunlar; Deneysel Metot, Analitik Metot, Nümerik Metot ve Kombine yaklaşımdır. Tüm bu metotlar arasında balistik mekaniği ve davranışı, balistik zıhları en iyi anlamamızı ve yeni jenerasyon zırh sistemleri üretmemizi sağlayan metot Kombine yaklaşımdır. Kombine yaklaşımdan kasıt, tek bir metot ile açıklamada zorlandığımız balistik davranışı iki metot kullanarak çözümleyebilmektir [3]. Örneğin balistik davranışın anlaşılabilmesi için öncelikle deneysel testler yapılarak model incelenir ve ardından nümerik metot ile parametreler üzerinde çalışılır.

1.1.8.1. Deneysel Metot

Deneysel metot, balistik anlamda kompozitlerin enerji absorpsiyon mekanizmalarını, balistik darbe mekanizmalarını, baskın enerji dağılım mekanizmalarını, enerji dağılımına bağlı olarak çekme kırılmasıyla beraber birincil ipliklerden ikincil ipliklere enerji geçişini ve diğer absorpsiyon mekanizmaları olarak delaminasyonlar, matrix kırılmaları, kayma tıkanmasını, iç yüzeyler arası sürtünme kuvvetlerini bulmaya çalıştığımız en direk metottur [4]. Örnek olarak yapılan deneysel bir çalışmada yüksek yoğunluklu polietilen (UHMWPE) ve farklı katmanlarda karbon fiber malzemelerin, hidrolik pres kullanarak, belirli basınç ve sıcaklık altında sıkıştırılması ile hibrit kompozit plakalar üretilmiştir. Üretilen plakaların, parçacık (fragment) tesirine karşı balistik dayanımları, STANAG 2920 standardına göre, dinamik laboratuvar şartlarında incelenmiştir. Sonuç olarak, 25 kat UHMWPE kompozite 1 kat, 3 kat veya 6 kat karbon fiber prepreg eklenmesiyle balistik dayanımının %8.06, %14.6 ve %22.6 oranında arttığı saptamıştır [15]. Diğer bir deneysel çalışmada aramid ve UHMWPE kompozit laminaları ile iki farklı kumaş

laminayı otoklav prosesi ile kürleyip, kompozit laminaların balistik davranışını, enerji absorpsiyonunu ve balistik limiti incelenmiştir. Çalışma sonucu kumaş katmanlarının oryantasyonunun balistik davranışa çok bir etkisinin olmadığı ancak katman kalınlığının enerji absorpsiyonu ile doğrusal bir ilişkisi olduğu ortaya konmuştur [16].

1.1.8.2. Analitik Model Metodu

Analitik model ile ilgili çalışmalara örnek verecek olursak, yayınlanan bir makalede analitik bir formülasyon ile mekanizma tarafından emilen enerji miktarını, balistik limiti, çarpma olayının süresini, kalınlık boyunca hasarı ve artık hızın tespit edilebileceği yazılmıştır. Ayrıca yapılan çalışmada balistik darbe durumunda, parçacık kütlesi ve çapıyla, kompozit kalınlığı arasında iyi bir korelasyon ilişkisi gözlemlenmiştir [3].

1.1.8.3. Nümerik Model Metodu

Nümerik simülasyon temelli yapılan çalışmalar sonlu eleman ve sonlu farklar metodu ile balistik darbe mekanizmalarını ve kompozit hasar modelleri çözümlenir. ABAQUS, ANSYS ve LS-DYNA gibi paket yazılımlarla beraber nümerik çalışmalar yapılmaktadır [3]. Yapılan bir nümerik çalışmada LS-DYNA içerisinde Dyneema HB26 fiberli kompozit plakaların modellemesi yapılmıştır. Literatürden alınan deneysel verilerle gerçekleştirilen çalışmada 600 m/s'nin altındaki darbe hızları için hazırlanan sayısal modele güzel bir yaklaşım elde edilmiştir [17]. Başka bir çalışmada yüksek mukavemetli TWARON sonlu eleman modeli oluşturmuş ve çözücü olarak LS-DYNA'yı kullanmışlardır. Farklı burunlara sahip tehditlerle simülasyon içerisinde farklı zaman adımlarında von-Mises gerilme dağılımı incelenmiş, enerji absorpsiyonunun ve açılan deliğin boyutlarının karşılaştırılması gibi çeşitli parametrelerin incelemesi yapılmıştır [18]. Yapılan diğer bir çalışmada LS-DYNA içerisinde aramid fiberlere .357 Magnum çekirdeği ile farklı hızlarda darbeler gerçekleştirilmiştir. Kompozit malzeme modellemede kullanılan MAT_162 ve MAT_58 malzeme modellerini kullanarak aramid fiberler üzerinde parametrik bir çalışma yapılmıştır [19].

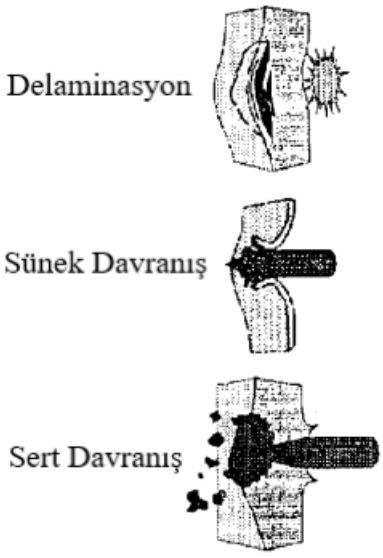
1.1.8.4. Kombine Yaklaşım

Balistik çözümlemede en etkili metot kombine metot olarak geçmektedir. Tek bir metotla açıklamakta zorlanılan mekanizmalar farklı metotların beraber kullanılmasıyla birlikte daha iyi çözümlenebilmektedir. Kombine metoda örnek olarak; Yapılan bir çalışmada deneysel olarak UHMWPE plakalara 20mm kalibre FSP (Fragment Simulating Projectiles) ile 400 – 2000 m/s hızlarda balistik darbe gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışma sonucu penetrasyon derinliği, balistik limit ve artık hız verileri elde edilmiştir. ANSYS AUTODYN kullanılarak deneysel koşulları yakınsama çalışması yapılmıştır. Bu çalışmada balistik limit ve artık hız tahminlerinde iyi bir uyum gözlemlenmiştir [20]. Başka bir çalışmada deneysel ve nümerik olarak Kevlar kumaş ve elastomer kompozitlerin yüksek hızlı darbe sonucu davranışı incelenmiştir. Hızları 122 m/s ile 152 m/s arasında değişen yarım küreler bir gaz silahı ile numunelere ateşlenmiştir. Laminaların dinamik davranışı Split Hopkinson Basınç Çubuğu ile belirlenmiştir. Sonlu elemanlar modeli, ABAQUS içerisinde oluşturulmuş ve enerji absorpsiyonu ve hasar mekanizmaları incelenmiştir [21].

Balistik darbe mekanizmalarını anlamak için kullanılan bu metotlar balistik kaskların balistik davranışını çözümlemek içinde kullanılmıştır. Yapılan bir çalışmada aramid kompozit bir başlık için deneysel ve nümerik incelemeler gerçekleştirilmiştir. Aramid'in balistik davranışını anlayabilmek için deneysel olarak FSP ve çelik küre tehditleri ile aramid düz plakalara balistik darbe uygulanmıştır. Deney sonucu davranışı anlaşılan aramid için nümerik bir kask tasarlanmıştır. Gerçek bir kask ve nümerik kask üzerinde farklı lokasyonlara karşı farklı küçük parçacıkların balistik darbe sonuçları kullanılarak aralarında bir karşılaştırma yapılmıştır [22]. Yayınlanan bir makalede muharebe kasklarının modern tasarım süreci gereksinimi olarak darbe direncini ve makul ağırlığı birleştiren zorlu gereksinimleri elde etmek için hem sayısal modelleme hem de deneysel doğrulamanın önemine değinmişlerdir. Yaptıkları çalışmada FSP ve FMJ (Full-Metal Jacketed) tehditleriyle aramid düz plakalara yapılan balistik darbe analizlerini deneysel olarak gerçekleştirip aramid kompozitlerin mekanik davranışını analiz etmişlerdir. Simüle etmek için sonlu elemanlar yöntemine dayalı sayısal modelleme kullanmışlardır. Hem basit kompozit plakalar hem de kukla üzerindeki iç köpük dahil balistik bir kaska gerçek mühimmatlar içeren deneysel çalışmalar yapılmış ve sayısal modellerin doğruluğunu yaptıkları çalışmada kanıtlamışlardır [23]. Yapılan diğer bir çalışmada

Kevlar'dan yapılmış balistik bir kaskın üzerinde yapmış oldukları deneysel ve AUTODYN-3D simülasyonlarından elde edilen sonuçlar sunulmaktadır. Bir gaz silahı vasıtasıyla fırlatılan 11.9 gr'lık küresel mermi 205 m/s darbe hızıyla Kevlar kaska ateşlenmiştir. Yüksek hızlı fotoğrafçılık ile elde edilen veriler AUTODYN-3D simülasyonlarından elde edilen veriler ile karşılaştırılmıştır. Bir FSP'ye karşı 9.5 mm kalınlığındaki Kevlar laminantların V_{50} balistik limitinin; hidrokod simülasyonlarında 610 m/s, deneysel test sonuçlarında ise 600 m/s olduğu görülmüştür. Kaskın simülasyonlarda verdiği tepki ile deneylerden alınan sonuçların uyumlu olduğu görülmüştür [24]. Kevlar bir kask üzerinde gerçekleştirilen deneysel ve nümerik bir çalışma ile ABD ordusunun kullandığı ACH kaskları kullanılmış, NIJ-0106.01 ve V_{50} standartlarına göre balistik testleri gerçekleştirilmiş ve nümerik bir model önerilmiştir.

Bir kaskın balistik koruması için darbe mesafesi, darbe noktası ve darbe noktasındaki eğriliği balistik performansı etkileyen ana parametrelerdir bundan dolayı çalışmada kaskın farklı bölgelerine atış gerçekleştirilmiştir. Çalışmada 1.1 gr FSP, 9 mm FMJ ve .223 tehditleri kullanılmıştır. Kaskın atış sonrası V_{50} değerleri için 689 m/s testlerden elde edilen sonuç olup, simülasyonda ise bu sonuç 678 m/s olarak bulunmuştur. Her iki doğrulama testi için de fiber kırılması, matris çatlaması ve delaminasyon olarak bulunmuştur. Test ve simülasyon çalışmaları uyum göstermiştir [25]. Balistik darbe sonucu hasar türlerine örnekler Şekil 9'da gösterildiği gibidir.



Şekil 9. Penetrasyon Modları [26]

Balistik çözümlemeler UHMWPE zırhlar üzerinde de yapılmıştır. Bu duruma örnek bir çalışma olarak, UHMWPE lamina plakaları ve UHMWPE ile kaplanmış alüminyum yapısallarının nümerik karakterizasyonları yapılmıştır. Deneysel çalışmalarla simülasyonların karşılaştırılması yapılmıştır. Penetrasyonlar beraberinde hasar mekanizmaları incelenmiştir. Plakaların delaminasyonları ve fiber kırılmaları incelenmiştir. Parçacık geometrisi ve hızının deformasyonları değiştirdiği tespit edilmiştir [27].

Başka bir çalışmada SiC/UHMWPE plakaların limit balistik penetrasyon koşulları irdelenmiştir. Tehdidin ilk hızına ilişkin 776- 791 m/s hızlarda atış yapılmıştır. Zırhın arka yüzlerde oluşan deformasyonlar irdelenmiştir. Parametrik düzenlemelerle hassas bir nümerik model oluşturulmuştur. Çalışma sonucunda kompozit balistik zırhın fragmanlara karşı balistik performansı çözümlenmiştir [28].

Yeni nesil kasklar üzerine yapılan bir çalışmada, nano kompozit esaslı hafif bir balistik kask geliştirmek amaçlanmıştır. Kompozit, kütlesel oranı 80/20 olan bir üretan prepolymer ile benzoksazin koporimerinin, aramid kumaş ve çok katmanlı karbon nano tüpleri ile güçlendirilmesiyle oluşturulmuştur. NIJ (National Institute of Justice) standartlarında koruma seviyesi 2 olan bir kask incelenmiştir. Ayrıca Kevlar ile kullanılan nano kompozit laminantların balistik limitini 632m/s'lere çıkartmış ve koruma anlamında umut vermiştir. Kalınlık 6.9 mm için analizler gerçekleşmiştir [29].

Başka bir çalışmada, kompozit balistik kask tasarım metodolojisi biyomekanik özellikler göz önünde bulundurularak sonlu eleman analizi yoluyla geliştirilmiştir. Modern savaş kaskları penetrasyona uğramasa bile yaralanmalara, travmalara ve insan vücudunda ciddi deformasyonlara sebep olabilir. Mevcut standart test metodolojileri yanı sıra bu çalışmada balistik denemeler ile travma arasındaki ilişki araştırılmıştır. Oluşturulan kask sayısal modeli ve kafa ölçüleri literatürden alınmıştır. Aramid'den üretilen kaska nüfuz etmeyecek yüksek hızlı balistik denemeler yapılmıştır ve test sonuçlarında tahmin ötesinde yaralanmalar ve travmalar ortaya çıkmıştır. Kafa boyutu ve mermi hızı gibi parametreleri değiştirilerek yapılan denemelerde sönümleyici kalınlıkları etkisinin önemli olduğu sonucuna varılmıştır [23].

Bu çalışmada Kevlar'dan imal edilmiş bir kaskın balistik etkisi üzerine yapılan deneylerden ve AUTODYN-3D simülasyonlarından elde edilen sonuçları karşılaştırılmıştır. Bir gaz silahından fırlatılan küresel mermi 205m/s'lik bir çarpma hızıyla kaska çarpmaktadır. Merminin Kevlar kaskla etkileşimi yüksek hızlı fotoğrafçılık kullanılarak yakalanmaktadır. Bu kask-mermi etkileşimi AUTODYN-3D simülasyonundan elde edilen verilerle karşılaştırıldığında deneylerden elde edilen test sonrası hasar fotoğrafları ile uyumlu olduğu görülmektedir. Çalışmada Kevlar kaskların üzerinde durulmuştur, çalışmalarda AUTODYN-3Ds simülasyonlarına yer verilmiştir. Bunlar NIJ Tip II ve Kişisel Zırh Sistemi Kara Birlikleri için ABD askeri şartnamesindeki standartlara uygun ve geçerliliğindeki kask, simülasyon için parça simülasyonu için kullanılan FSP 610m/s ile kaska çarptırılmıştır. Ancak çalışma sonunda bu hızın delme etkisi için yeterli olmadığı sonucuna varılmıştır. Kevlar kask NIJ-STD 0106.01 Tip II kask üzerindeki simülasyon için bir çalışma daha yapılmış ve mermi, 9 mm'lik tam ceketli bir mermi olarak 358 m/s hızda çarpmıştır. Simülasyondan elde edilen sonuçlar ışığında Kevlar kaskının 9 mm'lik tam ceketli bir mermiyi durdurabildiği görülmüştür [30].

Bir başka araştırmada ABD ordusunun aktif kullandığı (ACH) yani ileri seviye balistik kaskının nümerik modeli üzerinde çalışma gerçekleştirilmiştir. Standart olarak literatürden elde edilen verilerle NIJ-0106.01 standardı kabul edilmiştir. Simülasyon sonuçlarının deneysel verilerle karşılaştırılması yapılmış ve geliştirilen ACH modelinin 9 mm'lik ve 1.1 g simülasyon parçacığının balistik etkileri saptanmıştır. Temel etki parametreleri kaskın konumu, eğriliği, tehdit mesafesi olduğu bilinmektedir. Bu çalışmanın amacı; yüksek kalibreli .223 tüfeğinin 9mm'lik mermi etkisi altındaki performansının daha detaylı incelenmesi için yapılmıştır. Deney sonunda kaskın koruma sağladığı ve .223 tüfeğinin ve 9 mm'lik mermisinin delme için yetersiz olduğu tespit edilmiştir. Kask kalınlığı 10 mm, pad kalınlığı ise 20 mm olarak seçilmiştir [25].

Başka bir çalışmada modellenen bir kabuk aramid kaskın, sonlu elemanlar yöntemi ile analizi gerçekleştirilmiştir. Modellenen kaskın parça simülasyon mermisi FSP ve metal ceketli bir mermi etkisi altındaki mekanik davranışı incelenmiştir. Aynı zamanda aramid zırhlarda deneysel ve simülasyon ortamında denemeler gerçekleştirilmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır [31].

Başka bir çalışmada, Roma Plastilina kil dolgulu sert ve sabit kafa formuna monte edilmiş bir kaskın sonlu elemanlar yöntemi ile geçici deformasyonlarını analiz edilmiştir. Kask doğrusal elastik bir ortotropik malzeme olarak modellenen tek yönlü fiber takviyeli bir kompozitten yapılmıştır. Hashin kriterleri fiber ve matris hasarını simüle etmek için kullanılmıştır. Kil çarpma elastik plastik viskoplastik izotropik ve homojen bir malzeme olarak modellenmiştir. Çözüm programı olarak ABAQUS kullanılarak sayısal olarak gerçekleştirilmiştir. Daha önce başka yazarlar tarafından deneysel veya sayısal olarak çalışılmış olan birkaç etki problemini çözerek yazılımın penetrasyon problemlerini analiz etme yetenekleri doğrulanmıştır. Merminin kask üzerindeki etkisiyle miğferdeki katman sayısının ve kilde oluşan kraterin etkisi tasvir edilmiştir. Balistik limit tespit çalışmaları yapılmış ve lamina kalınlıkları 2 ve 4 mm alınmıştır. Kullanılan tehdit .22 kalibrelik FSP mermisi olarak seçilmiştir [32].

Görülebileceği üzere nümerik programlar balistik deneyleri simüle etmede başarılıdır. Geçmiş literatürde Kevlar (aramid) zırhlar üzerinde çok miktarda çalışmanın yanı sıra Kevlar kasklara da ait çok miktarda çözümleme mevcuttur. Her ne kadar UHMWPE plakalar üzerinde balistik çalışmalar başlasa da balistik bir kask için kombine bir çözüm bulunmamaktadır. Bu çalışma kapsamında UHMWPE balistik bir kask kombine yaklaşımla çözümlenmiştir.

1.2. Araştırmanın Amacı

Günümüzde sürekli olarak gelişme gösteren silah sistemleri ve diğer tehditlere karşı, zırh sistemlerinin de gelişme göstermesi kaçınılmazdır. Bu durum Ar-Ge faaliyetlerini kaçınılmaz kılmıştır. Tarih boyunca ülkeler arasındaki savaşlarda da ülkelerin sahip oldukları silah ve savunma araçlarının kabiliyetleri önemli rol oynamıştır. Bu alanda diğer ülkelerin sahip olmadığı teknolojiye sahip olan ülkeler, kendi bölgelerinde ve dünyada caydırıcı güç olma özelliği kazanmış ve dünyanın en güçlü ülkeleri arasında yer almışlardır. Ülkelerin sahip oldukları teknoloji izleyecekleri savunma politikaları açısından da oldukça önem taşımaktadır [12].

Artan nüfus ile kitleleri kontrol etmek zorlaşmış ve bu durum personel açığı oluşturmuştur. Kolluk kuvvetleri, polisler, jandarmalar ve diğer güvenlik mensupları sadece dış güçlere değil, ülke içindeki terör olaylarından, halk arasındaki silahlı suçlara, narkotik madde satan çetelere karşı da mücadele içindedir. Personelin hayatını ve güvenliğini korumak için araçlarda ve personel giyiminde zırh çalışmaları yapılmıştır.

Son teknolojik malzemelerden imal edilen ve personelin baş bölgesini koruyan ECH (Enhanced Combat Helmet) kaskının balistik performansını ve darbe mekaniğini anlamak için UHMWPE kompozitinden balistik bir kask üretilmiş ve balistik performansını uluslararası standartlara göre kombine yaklaşımlarla doğrulayarak balistik kaskın çözümlemesi yapılmıştır.

Balistik kask üretildikten sonra NIJ standartlarına göre 9 mm parabellum mermisi beş ana bölgeye ateşlenmiş ve katmanlı modellenen kompozit başlığın sayısal modeli yakınsanarak çözümlemeler yapılmıştır. Kompozit kaskta oluşan basınçlar, gerilme değerleri, delaminasyonlar ve kompozit hasarlarının incelenmesinin yanı sıra tehdit modeli de doğrulanmıştır. Bu tez sonucunda geleceğin balistik kask tasarımlarına ışık tutulması amaçlanmıştır.

1.3. Araştırmanın Önemi

Tarihten bu yana milletler savaşlarda üstünlük kazanmak için silahlar ve beraberinde zırhlar geliştirmişlerdir. Gelişen silah teknolojisiyle birlikte artan askeri ve asimetrik çatışma durumlarında güvenlik personellerini korumak önem arz etmektedir. İnsan

vücudunda en önemli bölge olan baş bölgesini korumak ayrı bir öneme sahiptir. Baş bölgesine gelen balistik bir darbe travmalara ve ölüme sebep olabilmektedir.

Ordular bu durumdan kaçınmak için balistik kasklar kullanmaktadırlar. Gelişmiş malzeme teknolojisi sayesinde kullanılan başlıklar tehditleri yüksek oranda durdurabilmektedirler. Hafif ve etkili zırhların tasarlanması askeri personel için oldukça önem arz etmektedir. Bu sebepten ötürü yüksek performanslı ve çok hafif balistik kompozit kumaşlar kullanılmaktadır. Bu kumaşlar arasında en yüksek performansa sahip olanı UHMWPE balistik kompozitidir. Gelişen teknolojilerle geometrisi optimize edilen kask modelleri arasında en çok tercih edilen bu balistik UHMWPE kompozitinden üretilen miğfere ise ECH (Geliştirilmiş Savaş Miğferi) denir.

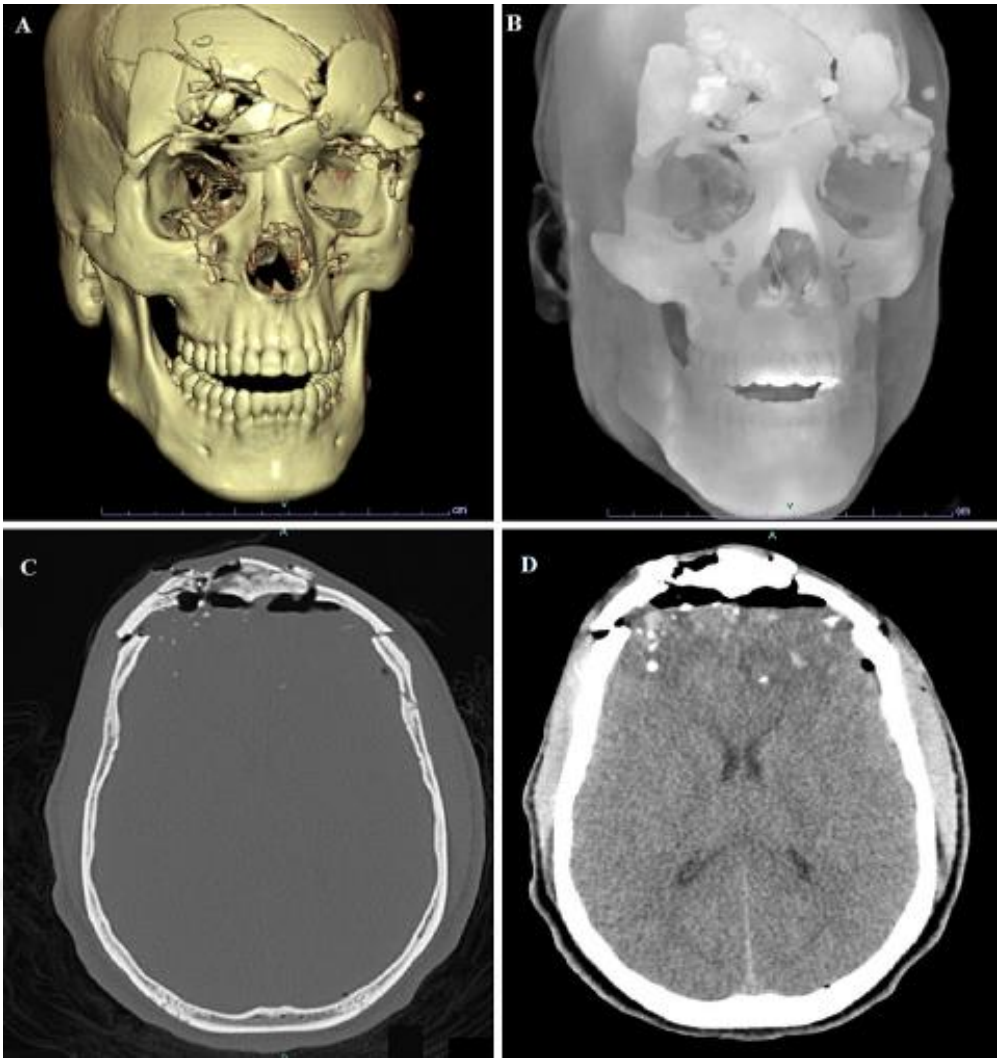
Balistik performansı incelemek için uluslararası standartlar kullanılır. Bu standartlar STANAG V_{50} balistik limit ve NIJ-0106.01 geçti-geçmedi standartlarıdır.

Gerçek tehditlerle yapılan atışlar sonucu geçti-geçmedi (perforasyon) durumunun incelendiği standart NIJ standardıdır. Zırhın ne kadar enerji emdiği ve en yüksek koruma seviyesinin tespiti FSP ile yapılan atışlar sonucu V_{50} balistik limitinin tespiti ile yapılır.

Bu çalışma kapsamında geçti – geçemedi testi olan NIJ-0106.01 standardı kullanılmıştır. Çünkü gerçek mühimmatlarla yapılan bu deneysel yaklaşımda miğferin sadece koruma, perforasyon durumları incelendiği gibi zırhı delmeyen tehditlerin oluşturduğu künt travma değerleri de ölçülebilmektedir. Künt travma, zırh delinmese bile personelin ciddi yaralanmasına ve hatta hayatını kaybetmesine sebep olabilmektedir. Künt travmanın örnek görseli Şekil 10'da gösterildiği gibidir.

Balistik koruma etkisini incelemek için balistik darbe mekaniğine hâkim olmak gerekmektedir. Tehdidin zırh içerisinde ilerleyişi ve ikili arasındaki mekaniklerin çözümlenmesi tasarımcılara ve geleceğin kasklarının geliştirilmesine katkıda bulunmaktadır.

Mühendislikte kullanılan sonlu elemanlar metodu ile çok karmaşık hesaplamalar çok hızlı ve gerçekçi çözülebilmektedir. Karmaşık mekanikleri modelleyebildiğimiz bu metot için kullanılan yazılımlar mevcuttur. Bu tez kapsamında ANSYS/LS DYNA kullanılmıştır. Bu çalışmada UHMWPE kompozitinden yapılmış kaskların üretimi, balistik deneyleri ve nümerik çözümlenmesi yapılmıştır.



Şekil 10. Balistik TBI (Beyin travması) örneği [33]

2. BÖLÜM

YÖNTEM VE MATERYAL

2.1. Yöntem

Bu tez kapsamında önceki bölümlerde anlatılan kombine yaklaşım metoduyla UHMWPE balistik kaskın üretimi sonrası NIJ-0106.01 balistik testler gerçekleştirilmiş ve sonlu elemanlar metoduyla birlikte kaskın balistik davranışı, travma üzerinde etkili olan penetrasyon değerleri incelenmiştir.

2.1.1. Balistik Kask Üretimi

Balistik kask üreticileri sürekli olarak daha iyi balistik koruma sağlayabilecek malzemeleri değerlendirmektedir. Bunun sonucunda Kevlar ve Kevlar'dan daha hafif, yüksek koruma performansı olan UHMWPE kasklar üretmek için çalışmaktadırlar. Aramid/fenolik kompozit kaskların üretimi, UHMWPE kaskların üretiminden çok farklıdır. Fenolikler, optimum performans için 165°C ila 175°C sıcaklık ve 10 ila 100 bar basınç kürleme koşullarına sahip termoset reçinelerdir. Tipik sertleşme süreleri 15-30 dakikadır bununla beraber parçalar kalıptan çıkarılmadan önce önemli bir soğutma işlemi gerekmemektedir.

UHMWPE parçalarının üretimi oldukça zordur, yüksek kalıplama basınçları altında yapı bütünlüğünü korurken bunu termal olarakta etkili bir şekilde yapmak gerekmektedir. Fiberlerin termoplastik olması, termal hasara karşı duyarlı oldukları ve uygun olmayan üretim şartlarında fiber yapısıyla beraber kompozitin tüm balistik özelliklerini kaybedeceği anlamına gelmektedir. UHMWPE malzemeleri, aramid işleme yöntemleriyle karşılaştırıldığında ideal performans elde etmek için önemli ölçüde daha yüksek kalıplama basınçlarına ihtiyaç duymaktadır. Parçaların ayrıca ısıtılması ve önemli ölçüde soğutulması gerekir, bu da termoset ve geleneksel elyaf işlemleriyle

karşılaştırıldığında çok daha uzun sertleşme sürelerine yol açar. Modern miğfer üretiminde yaygın iki metot derin çekme ve basınç altında kalıplamadır [2].

Miğfer üretiminde kalıplama işlemi şu şekildedir;

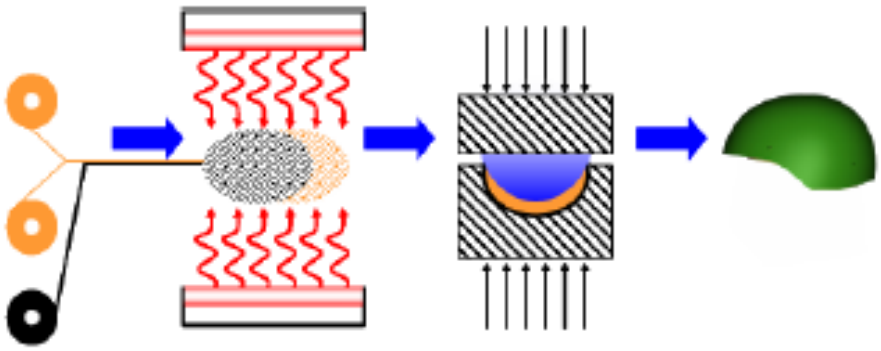
- Prepreg malzemesi serime uygun şekilde kesilmelidir.

- Malzemenin eşit kalınlıkta ve eşit katman sayılarında kalıba serilmesi ve kademeli olarak hizalandırılması gerekmektedir. Aksi halde kaskta zayıf bölgeler olacaktır.

- Kalıp içerisinde ısı ve basınç uygulanmalıdır.

- Son işlem olarak kalıptan çıkarılmaktadır.

Balistik kask üretiminin presleme adımlarında üretim parametreleri oldukça önemlidir. Proses başlangıç ve ana proses sıcaklığı 130 ℃ de ve 20 MPa basınçta olmaktadır. Proses pres 70 ℃'ye soğuyana kadar devam eder. Proses süresi yaklaşık 15 dk'dır [34]. Proses bittikten sonra kask formunu vermek için yarı mamul ürün kesime ardından astar ve boyama işlem adımlarına tabi tutulur. Balistik kaskların temel prosesi Şekil 11'de gösterildiği gibidir.



Şekil 11. Balistik başlık üretim prosesi [35]

Bir çalışmayı örnek gösterecek olursak, UHMWPE ve karbon fiber malzemelerin, hidrolik pres kullanılarak, belirli basınç ve sıcaklık altında sıkıştırılması ile hibrit kompozit plakalar üretilmiştir. UHMWPE elyafların özellikleri, basınç ve kayma mukavemeti ile sınırlanmaktadır. Malzemeler imal edilirken, ilk olarak kalıplar numune

ile birlikte oda sıcaklığından herhangi bir basınç verilmeden kalıp kapatılarak 125ºC'ye kadar ön ısıtma yapılmıştır. Sonrasında programlanabilir olan 600 tonluk hidrolik pres ile basınç yüklemesi yapılarak tam basınç altında 25 dakika preslenmiş ve son olarak 50ºC'ye kadar soğutulmuştur. Kalıptan alınan, boyutu 1 m^2 (Eni ve boyu 1 m) olan plakalar 24 saat oda sıcaklığında bekledikten sonra UHMWPE plaka zırh hazır hale gelmiştir (15). Balistik kask için üretim adımları genel hatlarıyla Şekil 12'de verilmiştir. Bu tez kapsamında ve standart olarak CES İleri Kompozit A.Ş.'de üretilen balistik kaskların görseli ise Şekil 13'te verildiği gibidir.



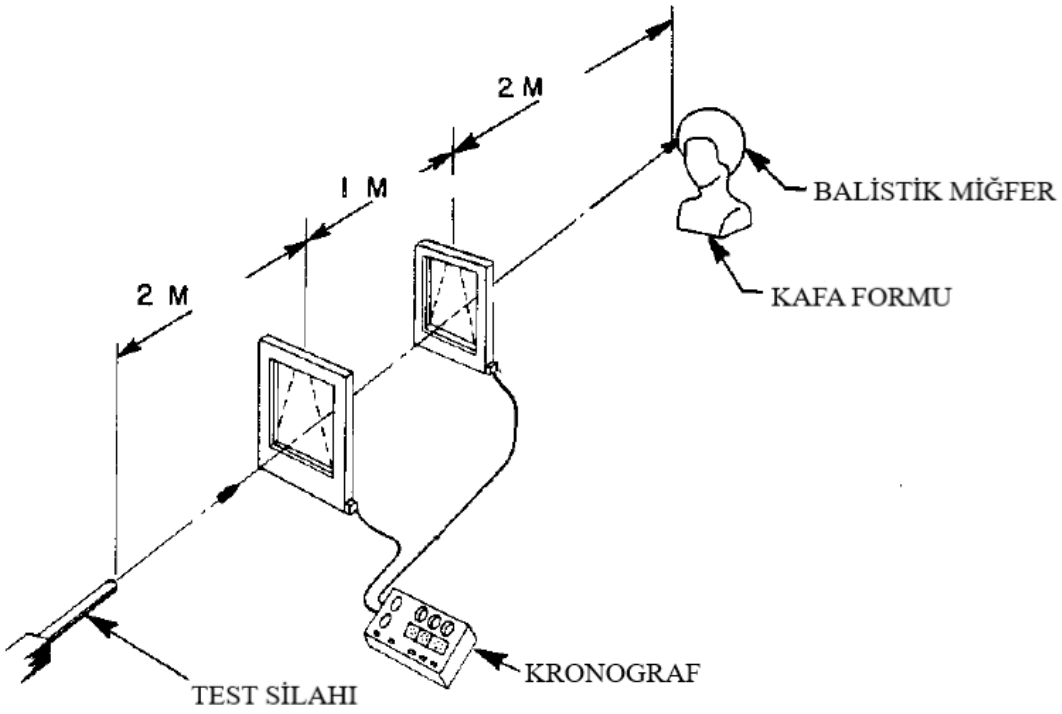
Şekil 12. Örnek balistik kask üretimi [34]



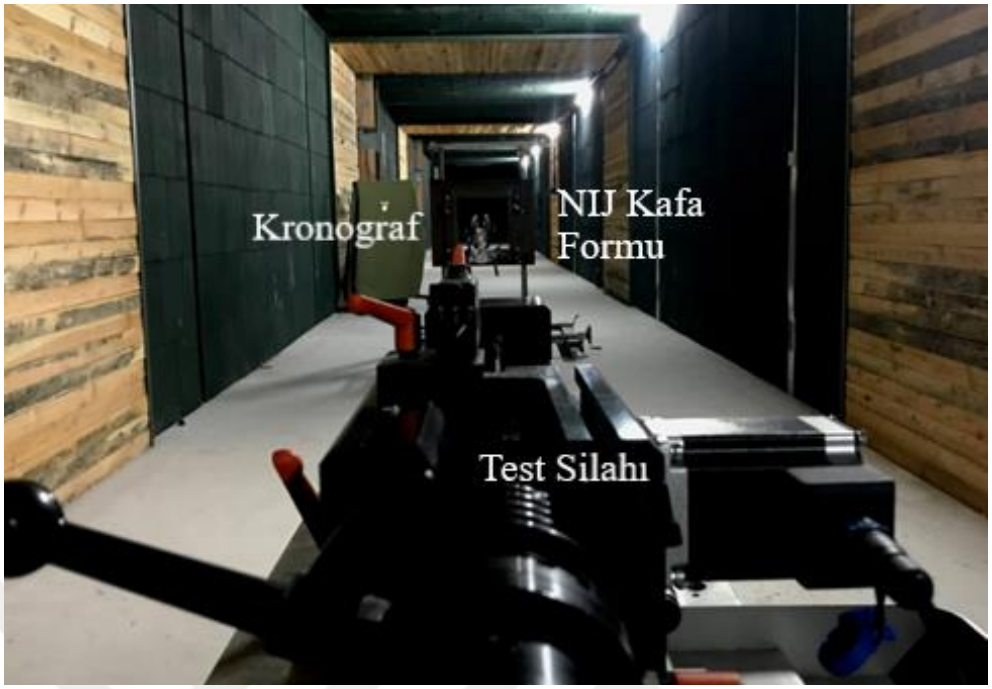
Şekil 13. Balistik kask üretimi (CES Kompozit)

2.1.2. Balistik Deneyler

Balistik performansı değerlendirebilmek için bilinen ve evrensel geçerliliği olan standartlar kullanılır. Bunlar NIJ-0106.01 ve STANAG 2920 balistik standartlarıdır. Burada NIJ-0106.01 standardı geçti veya geçmedi testi olarak özetlenebilir. Belirlenen tehditlere ilişkin dinamik yüksek hızlı darbelerden korunma durumu incelenir. Ayrıca balistik darbe ile kaskın delinmediği durum için künt travma incelenerek personelin yaralanıp yaralanmayacağı tespit edilir.



Şekil 14. NIJ standardına göre balistik test sistemi [36]



Şekil 15. NIJ standardına göre balistik test sistemi (CES Kompozit)

NIJ-0106.01 standardına göre test kurgusu Şekil 14'te verildiği gibidir. Balistik kask, alüminyum 6061 metalinden yapılmış bir kafa formuna Şekil 16'daki gibi oturtulur. Bu kafa formu insan başını simüle eder ve kaskı tutma vazifesini görür. Bu kaskın iç tarafı dinamik travma ölçülmek istenirse özel bir kil olan ve 36 ℃'ye kadar ısıtılmış Roma Plastina kili ile doldurulabilir. Bu kil, kurşun kaska çarpıp tüm enerjisini tükettiği andaki deformasyonunu korur ve zırh kendini toparlasa bile künt travmaya sebep olan darbenin mesafesinin ölçülmesine yardımcı olur. Kronograf ve ışın perdeleri ise tehdidin bir metre boyunca ki hızını ölçerek balistik darbe hızını anlamamıza yardımcı olur [36]. Bu tez kapsamında balistik deneylerin gerçekleştirildiği laboratuvar Şekil 15'te gösterilmiştir.



Şekil 16. NIJ kafa formu ve kaskın montajı

NIJ-0106.01 standardı gerçek FMJ'lerin (tam ceketli tehdit) bir barut silahından ateşlenmesiyle zırhın koruma etkisinin değerlendirilmesidir. Tablo 1'de gerçek mühimmatların türleri ve hızları paylaşılmıştır. Bu çalışma kapsamında seçilen koruma seviyesi ve aynı zamanda balistik kasklar için en yüksek koruma seviyesi NIJ III A'dır.

Tablo 1. NIJ balistik test standardı [36,37]

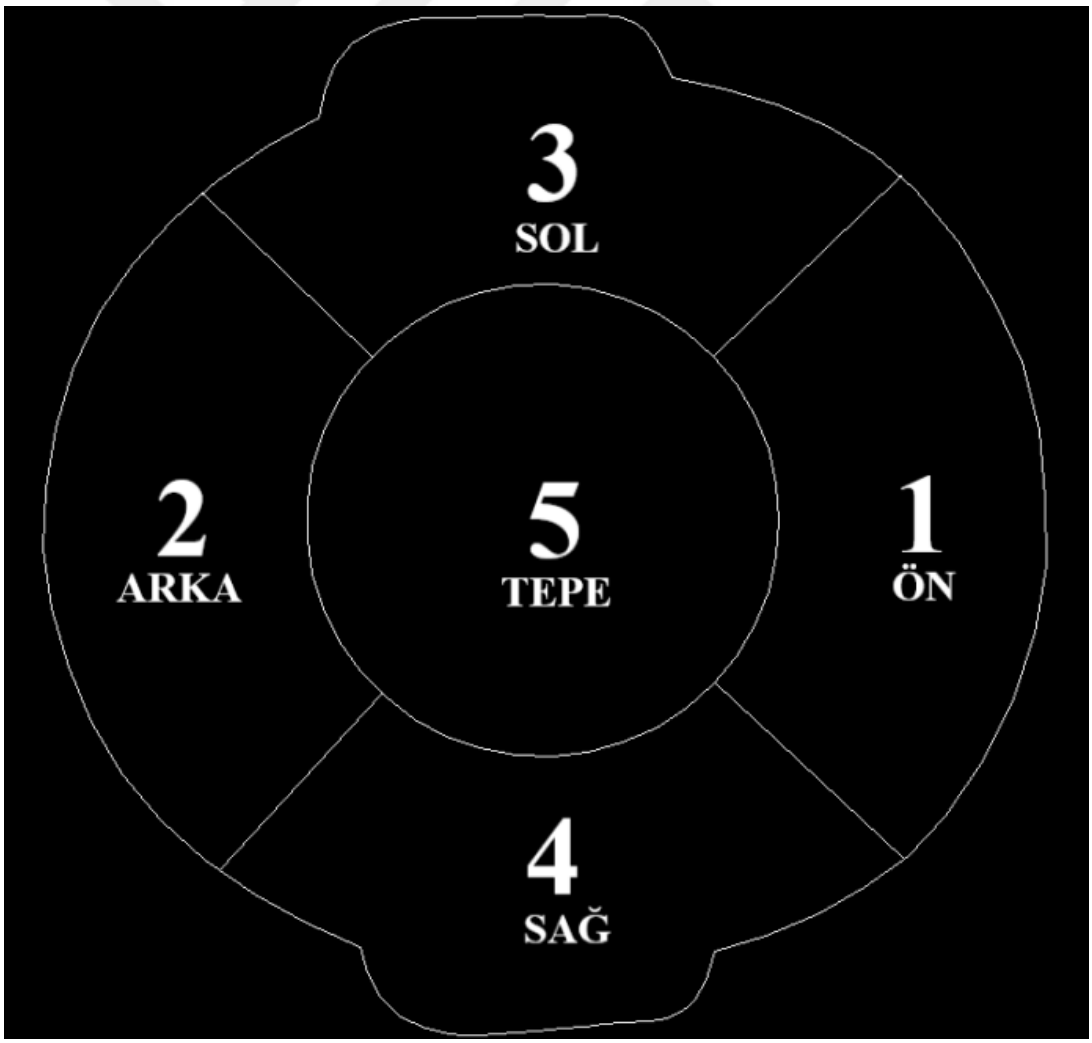
Koruma Seviyesi	Tehdit	Ağırlık (g)	Hız (m/s)
I	22 LRHV (Kurşun) 38 Special RN (Kurşun)	2.6 g 10.2 g	320 ± 12 m/s 259 ± 15 m/s
II-A	357 Magnum JSP 9 mm FMJ	10.2 g 8 g	381 ± 15 m/s 332 ± 15 m/s
II	357 Magnum JSP 9 mm FMJ	10.2 g 8 g	425 ± 15 m/s 358 ± 15 m/s
III-A	9 mm FMJ	8 g	436 ± 15 m/s



Şekil 17. Balistik deneylerde kullanılan 9 mm FMJ

Balistik deneylerde kullanılan tehdit ve barut içeriği Şekil 17'de verildiği gibidir. Pirinç cekete sahip kurşun çekirdek burada tehdidin zırha nüfuz ettiği kısımdır. Arda kalan kısımda ise kovan ve barut bulunmaktadır. İstenilen hız için ayarlanmış barut miktarı ile istenilen koruma seviyesi şartları sağlanabilmektedir. Tehdit hızı sistemdeki ışın perdeleri ve kronograf ile kolaylıkla tespit edilebilmektedir.

Barut miktarı ayarlanan ve hazırlanan kurşun, bir barut silahına yerleştirilir ardından ateşlenir. Hafif silahlar için ateşleme mesafesi beş metredir. Bunun sebebi, kurşunun ilk ateşlemeden sonra jiroskopik hareketle kararlı hale gelmeden önce yalpalamasıdır. Zırh performansını en iyi şekilde değerlendirmek için tehdidin en dik açıda ve en az şekilde kinetik enerjisini kaybetmiş olarak penetrasyon gerçekleştirmesi istenir. Bu sebepten dolayı tehditlere ve koruma seviyesi şartlarına göre farklı atış mesafeleri belirlenmiştir.



Şekil 18. NIJ balistik testlerde kaskın atış yapılan bölümleri

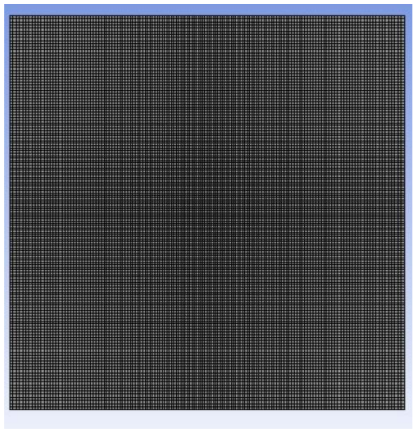
Kaskın form olarak çok eğrilikli yüzeylere sahip olduğu için her bir bölümünün tehdide vereceği reaksiyon farklıdır bunun için Şekil 18'de belirtilen farklı lokasyonlara balistik atış gerçekleştirilir. Sırasıyla gerçekleştirilen balistik atışlar sonucu test tamamlanır.

2.2. Materyal

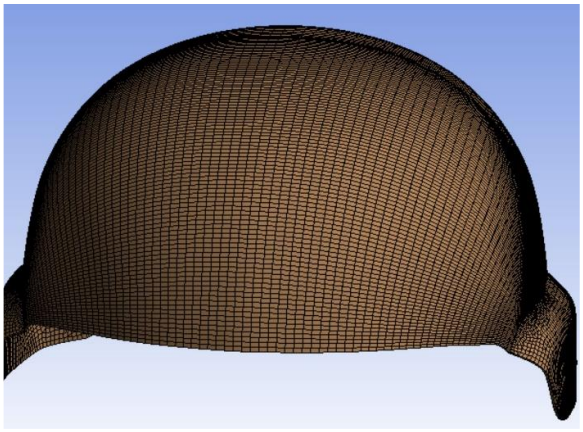
UHMWPE balistik kaskların sonlu elemanlar modelinin oluşturulması için farklı çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Öncelikle literatürden alınan veriler ile nümerik bir ön çalışma gerçekleştirilmiştir. Kabuk (shell) olarak modellenen Kevlar ve UHMWPE balistik zırhların çözümlemesi yapılmış ve literatürle karşılaştırılmıştır. Doğrulanan zırhlar için Kevlar ve UHMWPE kasklar modellenmiş ve balistik performansları karşılaştırılarak bir ön çalışma yapılmıştır. Ardından bu tez kapsamında gerçekleştirilen balistik deneyler için nümerik bir model oluşturulmuş ve balistik darbe sonucu oluşan deformasyonlar karşılaştırılmıştır.

2.2.1. Nümerik Ön Çalışmalar

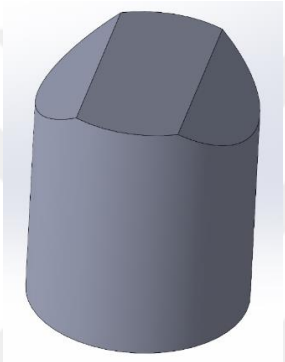
Balistik deneyler ve bu deneylerin sayısal modelleri oluşturulmadan önce nümerik bir değerlendirme ve karşılaştırma çalışması yapılmıştır. Bu ön çalışmada Kevlar ve UHMWPE malzemeler için literatürden alınan sırasıyla deneysel, analitik veriler ışığında Kevlar ve UHMWPE kompozitlerinin sayısal model doğrulaması yapılmış ardından doğrulaması yapılan modeller için bir kask modeli oluşturulup, Kevlar ve UHMWPE kaskların NIJ seviye 2'ye göre balistik performansları karşılaştırılmıştır. Kullanılan tehdit ve kabuk olarak sonlu elemanlar modeli oluşturulan yapılar Şekil 19'da verildiği gibidir. Burada 9 mm tehdit, kurşun ve FSP ise 4340 çeliği malzeme özelliklerini taşımaktadır.



Plakanın Sonlu elemanlar modeli



Balistik kaskın sonlu elemanlar modeli



FSP katı modeli



FMJ katı modeli

Şekil 19. Kask ve plakanın sonlu elemanlar modeli ve tehditlerin katı modeli

Ağ optimizasyonu için farklı ağ boyutlarına sahip kasklar üzerinde atışlar yapılmıştır. Çalışma hem Kevlar hem de UHMWPE kasklar için gerçekleştirilmiştir. Atıştan sonra meydana gelen arka yüz deformasyonu miktarı, ağa (mesh) bağlı sonuçların ihmal edilebilir ölçüde değişim gösterdiği ağ boyutu doğru kabul edilmiştir. Sonuçlar Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Balistik kask çalışmaları için ağ (mesh) optimizasyonu

Ağ Boyutu (mm)	Kevlar Kaskın Arka Yüz Deformasyonu (mm)	UHMWPE Kaskın Arka Yüz Deformasyonu (mm)
4	15.7	14.7
2	17.2	15.2
1	**16.9**	**18.8**
0.5	17.0	19.0

Şekil 19'da gösterilen sonlu eleman modelleri birçok balistik test gerçekleştirilerek optimize edilmiştir. Plakada 23.808 eleman, kaskta ise 15.363 eleman bulunmaktadır. Parametrik atış denemeleri ile mesh boyutu 1 mm olarak belirlenmiştir. Burada 1 mm mesh boyutunun altındaki mesh boyutlarında sonuçlar değişmemektedir. Plakalar kenarlardan sabitlenirken, kasklar kulak kısımlarının alt kenarlarından sabitlenmiştir. Bunun sebebi hem standartta kulaklardaki bağlantı aparatlarından fikstüre bağlandığı için hem de analiz sonucunu en az etkileyecek bölge olduğu içindir.

Kompozit modellemeler ANSYS/ACP içerisinde kabuk (shell) olarak yapılmıştır. Balistik çözümlemeler için çözücü olarak ANSYS/LS DYNA kullanılmıştır. Balistik kasklar 15 katmanlı ve 6.8 mm kalınlığında modellenmiştir. STANAG 2920 testleri için kullanılacak kompozit plakalar ise literatürden alınan kalınlık ve katman sayısı kullanılarak, doğrulandığı literatür çalışmasına göre modellenmiştir. Bu çalışma kapsamında 9 mm tehdit ve FSP rijit kabul edilmiştir.

Burada tehditler modellenirken MAT_RIGID (MAT_020) malzeme modeli kullanılmıştır. Bu malzeme modeli, modellenen parçayı şekil değiştiremez ve deforme olamaz kabul eder. Tehdit özellikleri Tablo 3'te verildiği gibidir.

Tablo 3. 9 mm tehdit ile FSP'nin mekanik özellikleri [25]

Tehdit	Yoğunluk (kg/m^3)	E (Elastik Modülü) (GPa)	v (Poisson oranı)
9 mm FMJ	10660	1	0.42
FSP	7866	206	0.3

Tüm zırhlar için de aynı malzeme modeli ve çözüm denklemleri kullanılmıştır. Malzeme modeli olarak MAT_ENHANCED_COMPOSITE_DAMAGE (MAT_54) malzeme modeli kullanılmıştır. Tehdit ve zırh arasındaki temas ilişkisi ERODING_SURFACE_TO_SURFACE temas algoritması ile tanımlanmıştır. Sayısal analizde, kompozit plakalarda fiziksel olmayan deformasyonlardan kaçınmak için Flanagan-Belytschko sertlik formuna dayanan 5. tip HOURGLASS tanımlanmıştır. Kompozit zırhlar modellenirken Tablo 4'te verilen mekanik özellikler tanımlanmıştır.

UHMWPE laminatların makroskopik gösterimi ortotropiktir. Bu ortotropik malzeme için sayısal ilişki şu şekilde ifade edilebilir:

Fiber çekme durumu için [38],

$$\sigma_{aa} > 0 \; ise \; e_f^2 = \left(\frac{\sigma_{aa}}{X_t}\right)^2 + \beta\left(\frac{\sigma_{ab}}{S_c}\right) - 1 \begin{cases} \geq 0 \text{ hasar durumu} \\ < 0 \text{ elastik} \end{cases} \quad (24)$$

$$E_a = E_b = G_{ab} = v_{ba} = v_{ab} = 0 \quad (25)$$

Fiber basma durumu için,

$$\sigma_{aa} < 0 \; ise \; e_c^2 = \left(\frac{\sigma_{aa}}{X_c}\right)^2 - 1 \geq 0 \text{ hasar durumu,}$$
$$< 0 \text{ elastik} \quad (26)$$

$$E_a = v_{ba} = v_{ab} = 0 \quad (27)$$

Matris çekme durumu için,

$$\sigma_{bb} > 0 \; ise \; e_m^2 = \left(\frac{\sigma_{bb}}{Y_t}\right)^2 + \beta\left(\frac{\sigma_{ab}}{S_c}\right)^2 - 1 \geq 0 \text{ hasar durmu için,}$$
$$< 0 \text{ elastik} \quad (28)$$

$$E_a = v_{ba} \rightarrow G_{ab} = 0 \quad (29)$$

Matris basma durumu için,

$$\sigma_{bb} > 0 \; ise \; e_d^2 = \left(\frac{\sigma_{bb}}{2S_c}\right)^2 + \left[\left(\frac{Y_c}{2S_c} - 1\right)^2 - 1\right]\frac{\sigma_{bb}}{Y_c} + \left(\frac{\sigma_{ab}}{S_c}\right)^2 - 1$$
$$\geq 0 \text{ hasar durumu için}$$
$$< 0 \text{ elastik} \quad (30)$$

$$E_b = v_{ba} = v_{ab} \rightarrow G_{ab} = 0 \quad (31)$$

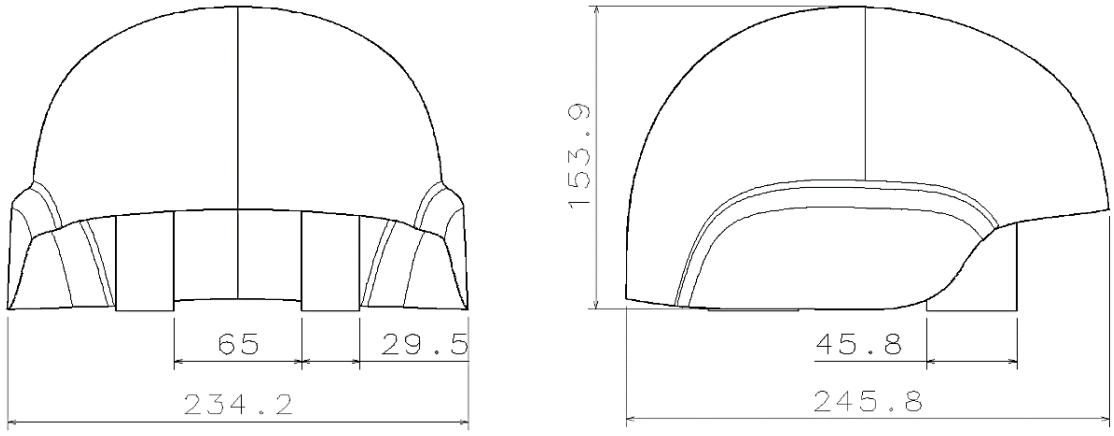
Tablo 4. Kevlar ve UHMWPE malzeme özellikleri [25, 27]

Mekanik Özellikler	Kevlar 129	UHMWPE (Dyneema HB 26)
Yoğunluk (kg/m^3)	1230	970
E_1 (GPa)	18.5	34.257
E_2 (GPa)	18.5	34.257
E_3 (GPa)	6	3.26
G_{12} (GPa)	0.77	0.1738

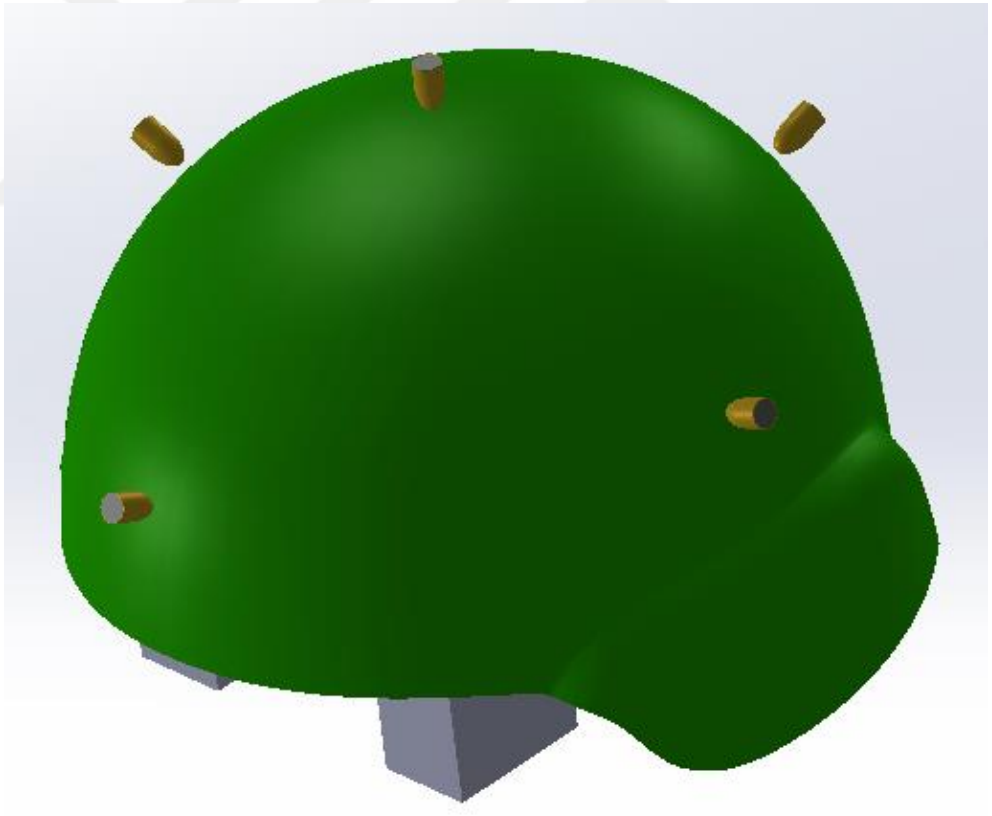
G_{23} (GPa)	2.5	0.5478
G_{13} (GPa)	2.5	0.5478
v_{12}	0.25	0
v_{23}	0.33	0.013
v_{13}	0.33	0.013
X_t (GPa)	0.555	1.25
Y_t (GPa)	0.555	1.25
S_c (GPa)	0.588	-
Y_c (GPa)	1.086	1.9
S_n (GPa)	0.835	-
S_{23} (GPa)	1.06	-
S_{31} (GPa)	1.06	-

2.2.2. Kask ve Kurşunun Sonlu Elemanlar Modeli

Balistik deney düzeneğinin önce katı modeli ardından sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur. Balistik simülasyonları yapılan kaskın boyutları Şekil 20'de verildiği gibidir. Bu tez kapsamında üretimi 28 katman olarak yapılan balistik kask, sayısal olarakta 28 katman laminaya sahip olup dört adet alüminyum 6061 tutucuya oturtulmuştur. Alüminyum tutuculardan sabitlenerek sınır şartları oluşturulan kaska tam dik açılı olacak şekilde 9 mm FMJ konumlandırılmıştır. 9 mm FMJ hem ceketli hem de çekirdekli olacak şekilde modellenmiştir. Tehdit ve kaskın birbirlerine göre konumlandırılması Şekil 21'deki gibidir.



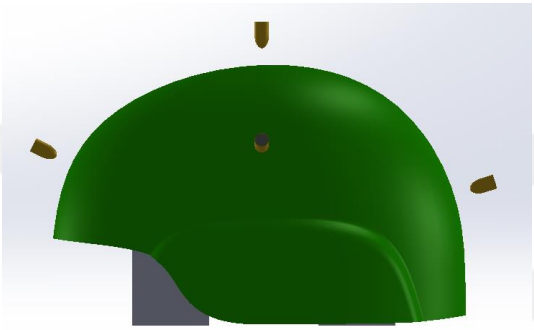
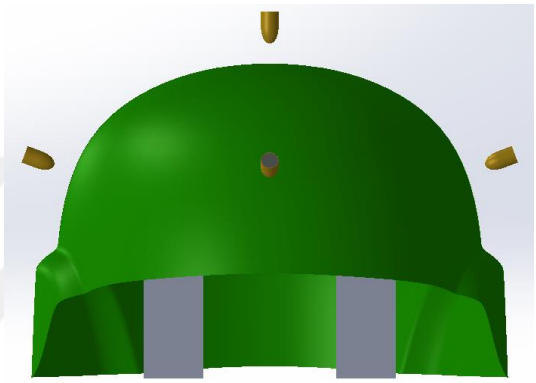
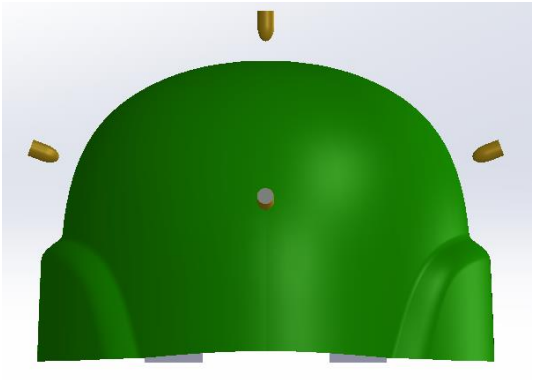
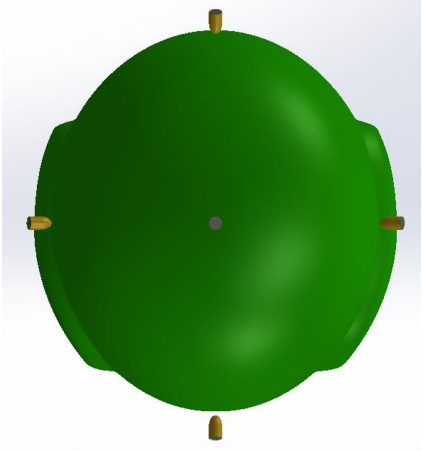
Şekil 20. Balistik kask ve tutucunun ölçüleri (Tüm ölçüler mm'dir.)



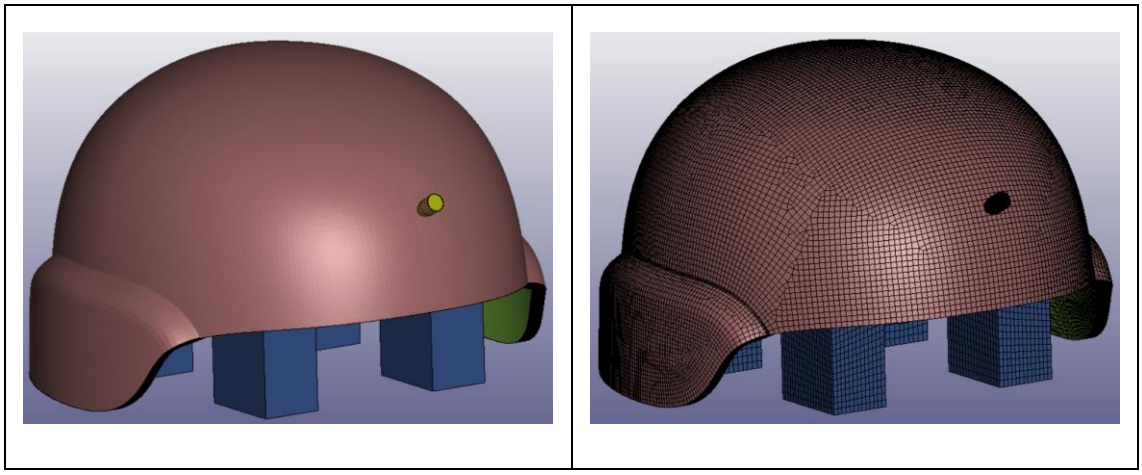
Şekil 21. Balistik deneyin sonlu elemanlar kurgusu katı model görünümü

Balistik deney kapsamında Şekil 18'de bahsedilen farklı noktalara yapılacak atış için tehditler tüm lokasyonlar için konumlandırılmıştır. Ön, üst, sağ, sol ve arka bölgelere konumlandırılan tam ceketli tehditlerin katı modeli Şekil 21'de verildiği gibidir.

Kask eğrisine dik çekilerek konumlandırılan 9 mm FMJ tehditlerin sırasıyla kaskın yan, ön, arka ve üst konumlarının gösterimi Şekil 22'de verildiği gibidir.

	
Balistik deney sonlu elemanlar kurgusu yandan görünüm	Balistik deney sonlu elemanlar kurgusu önden görünüm
	
Balistik deney sonlu elemanlar kurgusu arkadan görünüm	Balistik deney sonlu elemanlar kurgusu üstten görünüm

Şekil 22. Balistik deney sonlu elemanlar kurgusu model görünümleri



Şekil 23. Balistik deney düzeneği ve sonlu elemanlar modeli

Sonlu elemanlar modeli oluşturulan kask kabuğunun yüzey mesh boyutu 2 x 2 mm'dir. Laminaların tek elemanla kalınlığı verilmiştir. Bir lamine kalınlığı ~0.24 mm'dir. Tehdidin mesh boyutu 0.3 mm'dir. Balistik çözüm sisteminde toplamda 527856 eleman (element) ve 1145918 düğüm (node) bulunmaktadır. Ön taraftan atış için hazırlanan sonlu elemanlar modeli Şekil 23'de verildiği gibidir.

UHMWPE Kask, kompozit modellenirken katmanlar arası kuvvet CONTACT_AUTOMATIC_ONE_WAY_SURFACE_TO_SURFACE_TIEBREAK algoritması kullanılarak tanımlanmıştır. Burada normal yöndeki mukavemet 7.5^7 Pa ve kayma yönündeki mukavemet 1.25^8 Pa olarak atanmıştır. Tehditte kılıf ile çekirdek arası kontak algoritması ise AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE olarak belirlenmiştir.

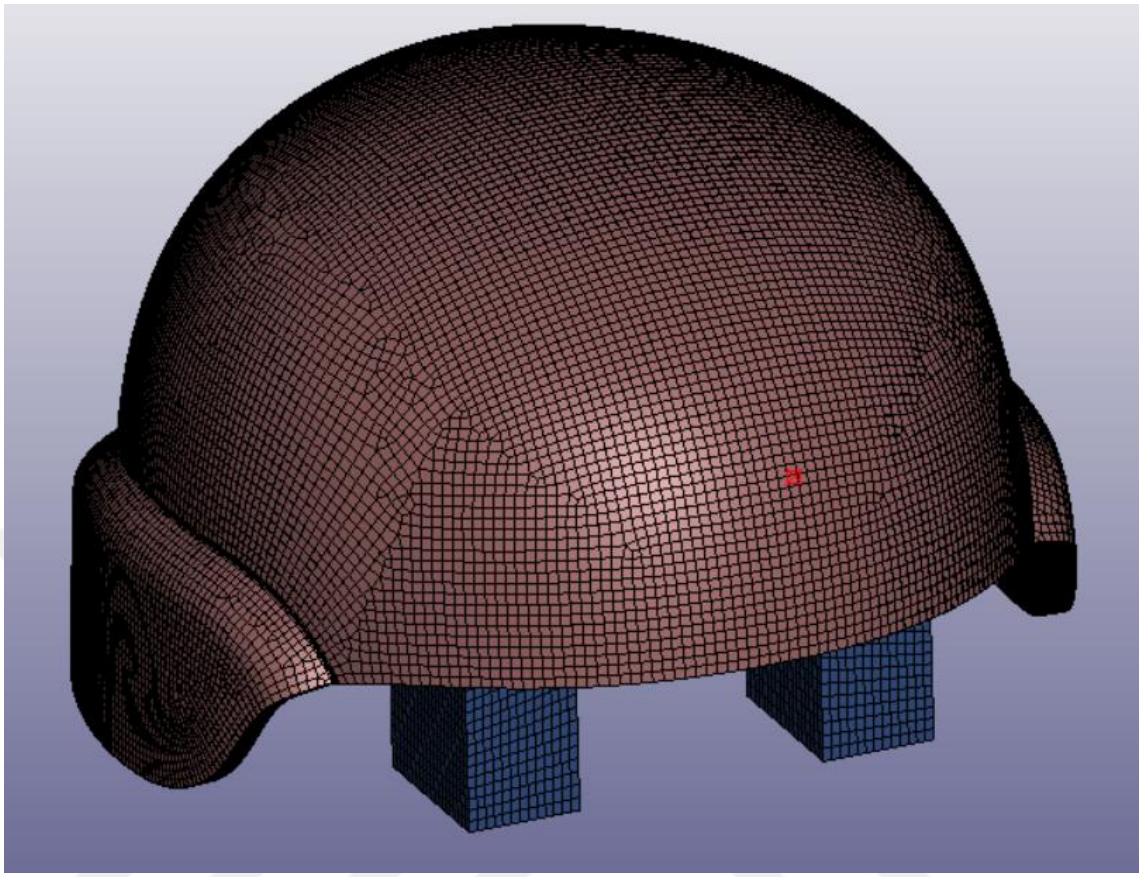
Tehdit ile kask arasındaki kontak ilişkisi ERODING_SURFACE_TO_SURFACE algoritması kullanılarak çözümleme yapılmıştır. Çözümlemede elemanların doğru bir şekilde silinmesi için HOURGLASS modeli olarak Flanagan-Belytschko Stiffness Form With Exact Volume Integration For Solid Elements (5) seçilmiştir.



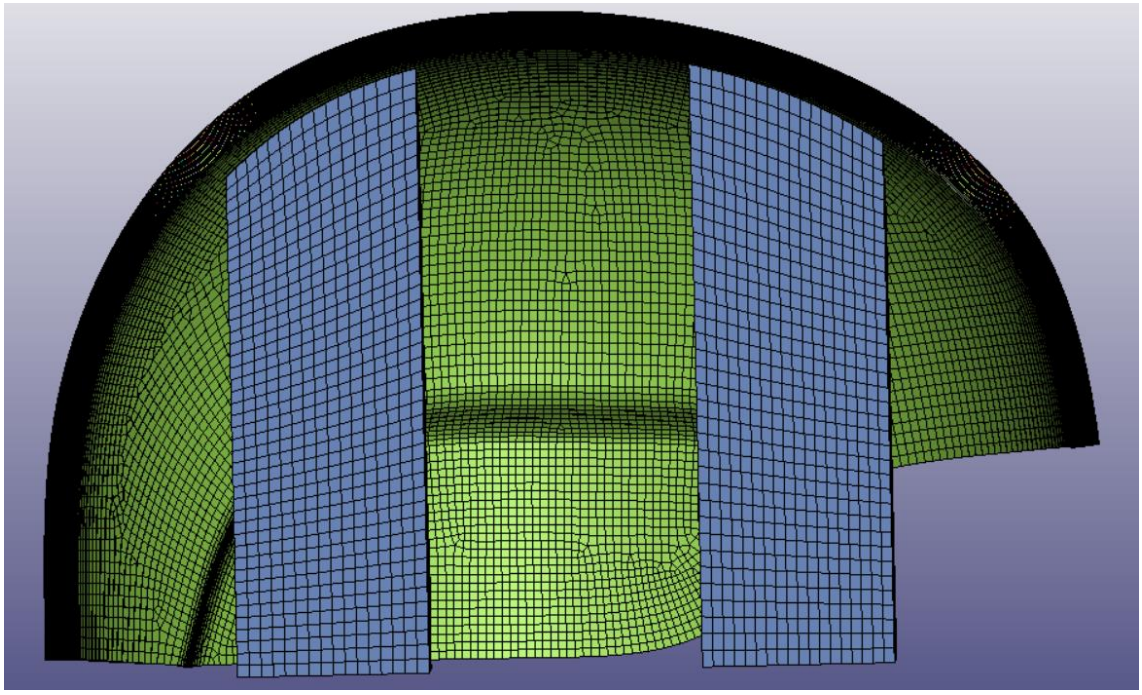
Şekil 24. 9 mm FMJ ceket ve çekirdeğin sonlu elemanlar modeli

Pirinç bir ceket ve kurşun bir çekirdekten oluşan 9 mm FMJ'nin sonlu elemanlar modeli Şekil 24'te verilmiştir. Burada ceketin ve çekirdeğin ayrı ayrı sonlu elemanlar modeli hazırlanmıştır.

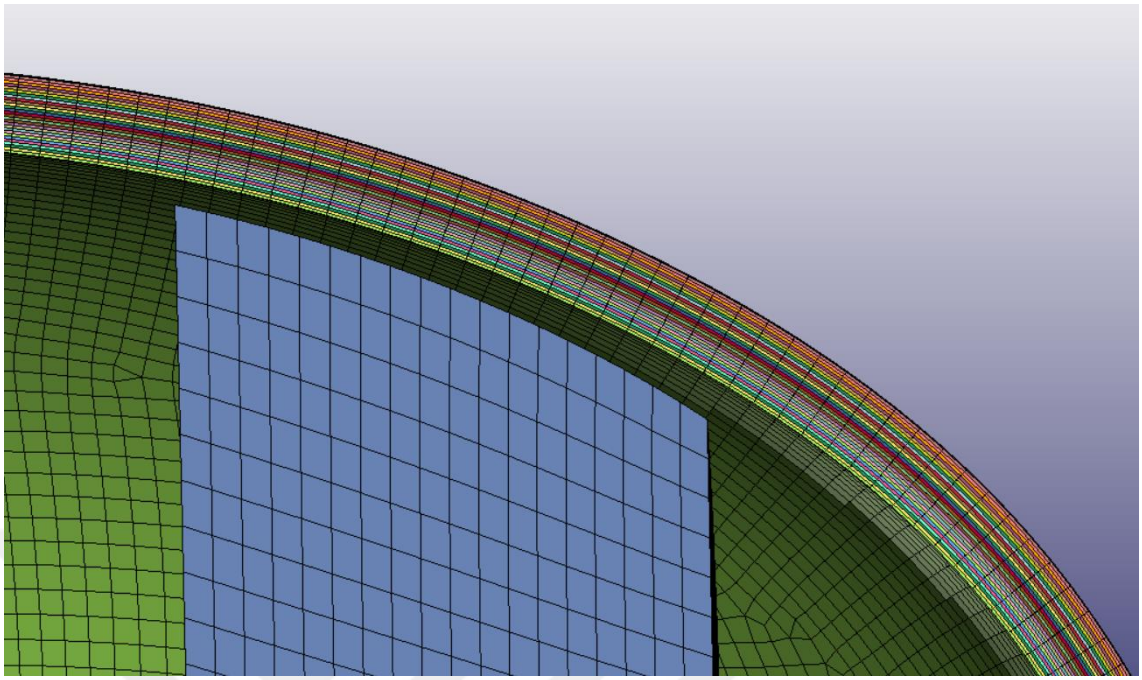
Kaskın ve tutucunun sonlu elemanlar modeli Şekil 25 ve Şekil 26'da gösterildiği gibidir. Laminaların detaylı sonlu elemanlar modeli ise Şekil 27'de gösterilmiştir.



Şekil 25. UHMWPE balistik kaskın sonlu elemanlar modeli



Şekil 26. UHMWPE balistik kaskın sonlu elemanlar modelinin kesit görünümü

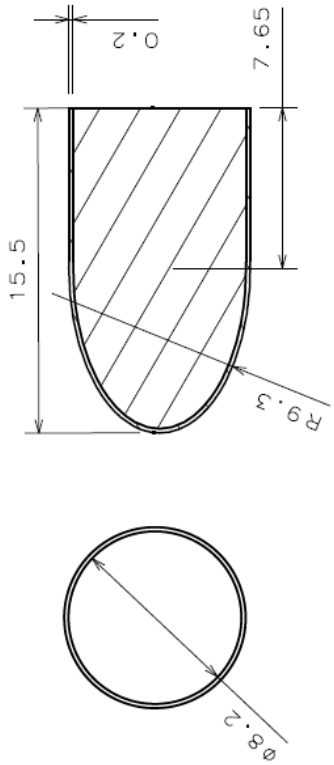


Şekil 27. UHMWPE balistik kaskın laminalarının sonlu elemanlar gösterimi

2.2.3. Malzeme Özellikleri ve Çözüm Denklemleri

Bu tez kapsamında balistik deneylerin penetrasyon mekaniğini çözümlemek için nümerik bir model oluşturulup yakınsaması sağlanmıştır. NIJ-0106.01 standardına göre gerçekleştirilen deneysel testler için tam ceketli ve çekirdekli 9 mm FMJ modeli oluşturulmuş ve farklı lokasyonlardan UHMWPE kaska balistik darbesi nümerik olarak yapılmıştır.

Şekil 28'de boyutları verilen 9 mm FMJ için malzeme modeli MAT_MODIFIED_JOHNSON-COOK olarak seçilmiştir. Tehdit katı olarak, ağırlığı standartlara uygun 8 gr olacak şekilde tasarlanmıştır. Tehdit, kurşun bir çekirdek ve namlu içi sürtünmeyi azaltmak için pirinçten bir ceket ile modellenmiştir. Bu modelde kurşun ve ceketi arasındaki kontak ilişkisi çözülemez olarak tanımlanmıştır. FMJ mekanik özellikleri Tablo 5'te gösterildiği gibidir [38].



Şekil 28. 9 mm FMJ malzeme modelleri ve mekanik özellikleri

Tablo 5. 9 mm FMJ malzeme modeli ve mekanik özellikleri [23]

MALZEME ÖZELLİKLERİ	KURŞUN ÇEKİRDEK	PİRİNÇ CEKET
MAT_MODIFIED_JOHNSON-COOK		
Yoğunluk (kg/m^3)	10660	8520
Young Modülü (E) (GPa)	1	115
Poisson Oranı (v)	0.42	0.31
Taylor-Quinney Katsayısı (XSI)	0.9	0.9

Özgül Isı (C_P)	124	385
Termal Uzama Katsayısı (m/mK)	2.9^{-5}	1.9^{-5}
Gerinme Oranı Normalizasyon Faktörü	5^{-4}	5^{-4}
Oda Sıcaklığı (K)	293	293
Erime Sıcaklığı (K)	760	1189
Akma Gerilmesi (Pa)	2.4^{7}	2.06^{8}
Sertleşme Parametresi-B (Pa)	3^{8}	5.05^{8}
Sertleşme Parametresi-n	1	0.42
Sertleşme Parametresi-C	0.1	0.01
Termal Yumuşama Katsayısı (m)	1	1
Hasar Eşiği	1.75^{8}	9.14^{8}
EOS_GRUNEISEN		
EOS Sabiti (c) (m/s)	2006	3667
EOS Sabiti (S_1)	1.429	1.507
EOS Sabiti (S_2)	0	0

EOS Sabiti (S_3)	0	0
EOS (gamao)	2.74	2.086
EOS (a)	0	0.485

MAT_MODIFIED_JOHNSON-COOK (MAT_107) malzeme modeli çözümlerine adyabatik termal etkileri dahil eder. Birleşik bir termal-mekanik malzeme modelidir. Bu çözüm modelinde;

Deformasyon hızı tensörünün ‘‘d’’ eklemeli bir ayrışımı olduğu varsayılır,

$$\mathrm{d} = d^e + d^p + d^t \tag{6}$$

Burada d^e elastik kısım, d^p plastik kısım, d^t termal kısımdır. d^e ‘nin elastik deformasyon oranı lineer hypo-elastik ilişki olarak açıklanırsa;

$$\tilde{\sigma}^{\nabla J} = \left(K - \frac{2}{3}G\right) tr(d^e)I + 2Gd^e \tag{7}$$

Burada I birim tensörü, K bulk modülü ve G kayma modülüdür. Gerilme tensörü etkisi tanımlanırsa;

$$\tilde{\sigma} = \left(\frac{\sigma}{1-\beta D}\right) \tag{8}$$

Burada **σ** Cauchy gerilmesi ve D hasar değişkenidir. Efektif gerilmenin Jaumann oranı ise;

$$\tilde{\sigma}^{\nabla J} = \dot{\tilde{\sigma}}\text{-}W.\tilde{\sigma} - \tilde{\sigma}.W^T \tag{9}$$

Burada W, döndürme tensörüdür. β parametresi birleşik hasar için bire eşittir ve ayrılmamış hasar için sıfıra eşittir.

Termal deformasyon oranı tanımı;

$$d^T = \alpha \dot{T} I \tag{10}$$

Olarak verilebilir. Burada α lineer termal genleşme katsayısı ve *T* sıcaklıktır.

Plastik deformasyonu tanımlamak gerekirse;

$$d^p = \dot{r}\frac{\partial f}{\partial \sigma} = \frac{3}{2}\frac{\dot{r}}{1-\beta D}\frac{\tilde{\sigma}'}{\tilde{\sigma}_{eq}} \tag{11}$$

Burada $(.)'$ tensörün deviatorik kısmını, *r* ise hasara eşdeğer plastik gerinmeyi ifade eder, *f* ise dinamik verim fonksiyonudur.

$$f = \sqrt{\frac{3}{2}\tilde{\sigma}' : \tilde{\sigma}'} - \sigma_Y(r, \dot{r}, T) \leq 0, \dot{r} \geq 0, \dot{r}f = 0 \tag{12}$$

$$\tilde{\sigma}_{eq} = \sqrt{\frac{3}{2}\tilde{\sigma}' : \tilde{\sigma}'} = (1-\beta)\tilde{\sigma}_{eq} \tag{13}$$

Burada $\tilde{\sigma}_{eq}$, hasara sebep olan eş değer gerilme demektir.

$$\dot{p} = \sqrt{\frac{2}{3}d^p : d^p} = \frac{\dot{r}}{(1-\beta D)} \tag{14}$$

p burada plastik gerinme olup, yapılan iş;

$$\dot{W}^p = \tilde{\sigma}_{eq}\dot{p} \tag{15}$$

Olarak yazılabilir. σ_Y malzeme mukavemeti için;

Modifiye edilmiş Johnson-Cook temel ilişkisi;

$$\sigma_Y = (A + Br^n = \sum_{i=1}^{2} Q_i\,(1 - \exp\,(-C_i r)))((1 + \dot{r}^*)^C)(1 - T^m) \tag{16}$$

Olarak ifade edilir. $A, B, C, m, n, Q_1, C_1, Q_2, C_2$ malzeme özellikleri normalize edilmiş hasara sebep olan eş değer plastik gerinme oranına bağlıdır.

Burada eş değer plastik gerinme oranı;

$$\dot{r}^* = \frac{\dot{r}}{\dot{\varepsilon_0}} \tag{17}$$

Olarak ifade edilir. Burada $\dot{\varepsilon_0}$ ifadesi referans gerinme oranıdır.

Homojenize sıcaklık ise;

$$T^* = \frac{T-T_r}{T_m-T_r} \tag{18}$$

Olarak ifade edilir. T_m ergime sıcaklığı ve T_r ise oda sıcaklığıdır [38].

Tehdit ile zırh arasındaki kontak ilişkisi ERODING_SURFACE_TO_SURFACE'tir. Bu kontak ilişkisi; balistik darbe, yüksek hızda aşınma gibi durumlarda yani temasın yüksek hızda gerçekleştiği durumlarda malzeme erozyonuna göre malzemeyi silerken yeni kontak ilişkileri oluşturur. Sonlu eleman analizinde "kum saati etkisi", özellikle açık dinamik analizde belirli eleman türleri kullanıldığında ortaya çıkabilen bir tür sayısal kararsızlığı ifade eder. Kum saati ‘‘Hourglass’’ (HG) modları, sıfır gerilme ve sıfır gerinim üreten, fiziksel olmayan, sıfır enerjili deformasyon modlarıdır. Daha sağlıklı bir şekilde düğüm (node) ve elemanları (element) silmek, daha doğru sonuçlar alabilmek için önemlidir. Bu tez kapsamında, balistik simülasyonlarda Flanagan-Belytschko Stiffness formülasyonları kullanılmıştır.

MAT_COMPOSITE_FAILURE_SOLID_MODEL, kompozit malzemelerin mekanik davranışlarını ve bu malzemelerin kırılma kriterlerini değerlendirmek için geliştirilmiş matematiksel ve hesaplamalı modelleri içerir [39]. Kompozit mekaniği modelinde gerilme ve gerinme arasındaki ilişki;

$$C_L^{-1} = \begin{Bmatrix} \frac{1}{E_1} & \frac{-v_{12}}{E_1} & \frac{-v_{13}}{E_1} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-v_{12}}{E_2} & \frac{1}{E_2} & \frac{-v_{23}}{E_2} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-v_{13}}{E_3} & \frac{-v_{23}}{E_3} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{13}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{Bmatrix} \tag{19}$$

Burada E – Elastik Modül, G – Kayma Modülü, v – Poisson oranıdır. C_L cinsinden tanımlanan kurucu matris ortogonal malzeme eksenlerinin malzeme sabitleri {1,2,3}'tür. UHMWPE mekanik özellikleri Tablo 6'da gösterildiği gibidir.

Tablo 6. UHMWPE malzeme modeli ve mekanik özellikleri [39]

MAT_COMPOSITE_FAILURE_SOLID_MODEL	
Yoğunluk (kg/m^3)	970
Young Modül ‘‘x’’ yönü (E_1) (GPa)	93
Young Modül ‘‘y’’ yönü (E_2) (GPa)	93
Young Modül ‘‘z’’ yönü (E_3) (GPa)	11.5
Poisson Oranı (v_{12})	0.006
Poisson Oranı (v_{23})	0.006
Poisson Oranı (v_{13})	0.006
Kayma Modülü ‘‘xy’’ yönü (G_{12}) (GPa)	4.6
Kayma Modülü ‘‘yz’’ yönü (G_{23}) (GPa)	5
Kayma Modülü ‘‘xz’’ yönü (G_{13}) (GPa)	5
Düzlem İçi Kayma Mukavemeti-ab (Pa)	1^{38}
Enine Kayma Mukavemeti-ac (Pa)	1^{38}
Enine Kayma Mukavemeti-cb (Pa)	1^{38}
Boyuna Basma Mukavemeti (Pa)	1^{38}
Enine Basma Mukavemeti (Pa)	1^{38}
Normal Yöndeki Basma Mukavemeti (Pa)	8^{8}
Boyuna Çekme Mukavemeti (Pa)	1^{9}

Enine Çekme Mukavemeti (Pa)	1^{9}
Normal Yöndeki Çekme Mukavemeti (Pa)	1^{38}

MAT_COMPOSITE_FAILURE_SOLID_MODEL malzeme modeli Chang-Chang hasar kriterine göre çözüm yapmaktadır. Chang-Chang hasar kriterinin ana denklemleri;

Fiber çekme hasarı ($\sigma_{11} \geq 0$):

$$F_{mt} = (\frac{\sigma_{11}}{X_T})^2 + (\frac{\sigma_{12}}{S_{12}})^2 + (\frac{\sigma_{13}}{S_{13}})^2 \geq 1 \quad (20)$$

Fiber basma hasarı ($\sigma_{11} < 0$):

$$F_{mt} = (\frac{\sigma_{11}}{X_C})^2 \geq 1 \quad (21)$$

Matris çekme hasarı ($\sigma_{22} \geq 0$):

$$F_{mt} = (\frac{\sigma_{22}}{Y_T})^2 + (\frac{\sigma_{12}}{S_{12}})^2 \geq 1 \quad (22)$$

Matris basma hasarı ($\sigma_{22} < 0$):

$$F_{mt} = (\frac{\sigma_{22}}{S_{12}})^2 + (\frac{\sigma_{12}}{S_{12}})^2 + \frac{Y_C \sigma_{22}}{4S_{12}^2} - \frac{\sigma_{22}}{Y_C} \geq 1 \quad (23)$$

Olarak ifade edilir. Burada, σ_{11}, σ_{22}, σ_{33}, efektif gerilme tensörleridir. σ_{12}, σ_{13}, σ_{23} kayma gerilmeleridir. X_T, X_C, Y_T, Y_C fiber çekme ve basma mukavemetidir. Sırasıyla matris çekme ve basma mukavemeti ise S_{12}, S_{13}, S_{23} olarak ifade edilir [38].

3. BÖLÜM

BULGULAR

3.1. Nümerik Ön Çalışma Bulguları

3.1.1. Kevlar Zırh Plakasının Balistik Limit Çalışması

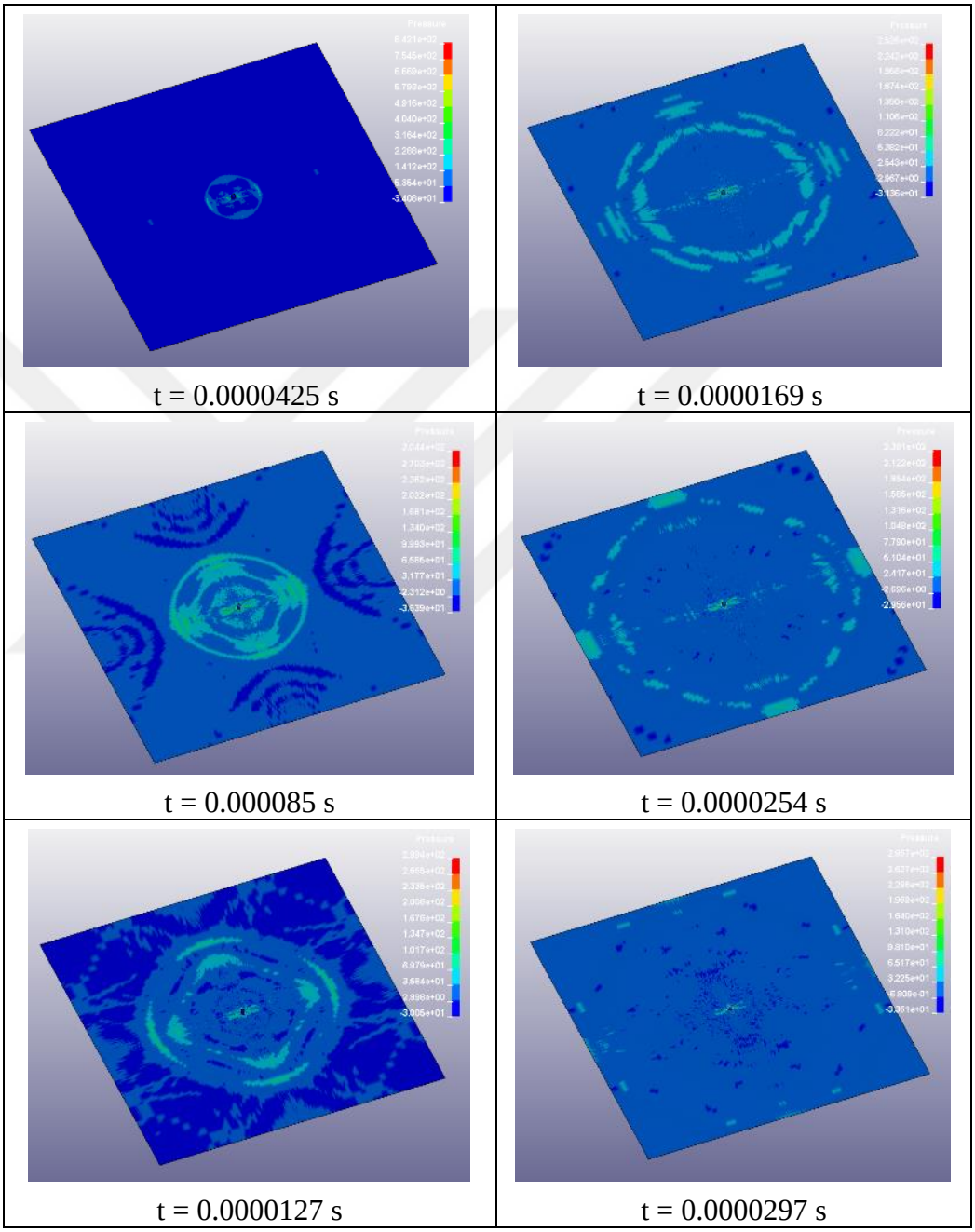
Balistik limit çalışması istatistiksel bir çalışmadır. STANAG standartlarına göre V_{50} balistik limit tespiti en az altı atıştan yapılır. Zırhı delip geçebilecek en düşük hızdaki üç atışın ve zırhı delip geçemeyecek en yüksek hızdaki üç atışın ortalamasıdır. Balistik limit hızı zırhın tehdide ait enerjiyi tamamen tüketebildiği andır. 400x400x9.1 mm (20 lamina) boyutlardaki Kevlar plakaya 0.22 kalibrelik FSP'ler ateşlenmiştir. Eğer FSP zırhı tam deliyorsa tam penetrasyon (Complete Penetration- CP), kısmen deliyorsa kısmi penetrasyon (Partial Penetration- PP) olmuştur denir. Bu balistik limit çalışmasında daha öncesinde yapılan deneysel bir sonuca yakınsanmaya çalışılmıştır. Sonuçlar Tablo 7'de gösterildiği gibidir.

Tablo 7. Literatürdeki deneysel balistik limit çalışmaları ve bu çalışmada gerçekleştirilen balistik limit hesaplaması [23].

Balistik Darbe	Çarpma Hızı (m/s)	CP	PP	Literatürden Alınan Deneysel V_{50} Çalışması ve Sonucu (±30 m/s) **686.6**
1	696.3	✓		
2	691.5	✓		
3	658.5		✓	
4	665.6		✓	
5	692.2		✓	
6	703.7	✓		
7	670.2		✓	
Balistik Darbe	Çarpma Hızı (m/s)	CP	PP	Balistik limit çalışması (±10 m/s) **720**
1	680		✓	
2	690		✓	
3	700		✓	
4	710		✓	
5	720	✓		
6	730	✓		
7	740	✓		

ANSYS/ACP içerisinde kompozit modellenen Kevlar plaka ANSYS/LS DYNA çözücüsü kullanılarak balistik simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Zırhın delinmediği en yüksek üç hız ile zırhın delindiği en düşük üç hızın tespit edilebilmesi için balistik

simülasyonlar 680 m/s'den başlayarak ve onar onar darbe hızı arttırılarak balistik limit hızı tespit edilmiştir. Simülasyonların sonucunda balistik limit hızı %4.64 hata oranıyla 720 m/s olarak bulunmuştur.



Şekil 29. Kevlar plakalardaki basınç dağılımının zamanla değişimi

Şekil 29'da .22 kalibre FSP'nin 720 m/s hızla Kevlar plakaya çarptığı andaki zamana bağlı basınç dağılımı gösterilmektedir.

3.1.2. UHMWPE Zırh Plakasının Balistik Darbe Sonrası Artık Hız Çalışması

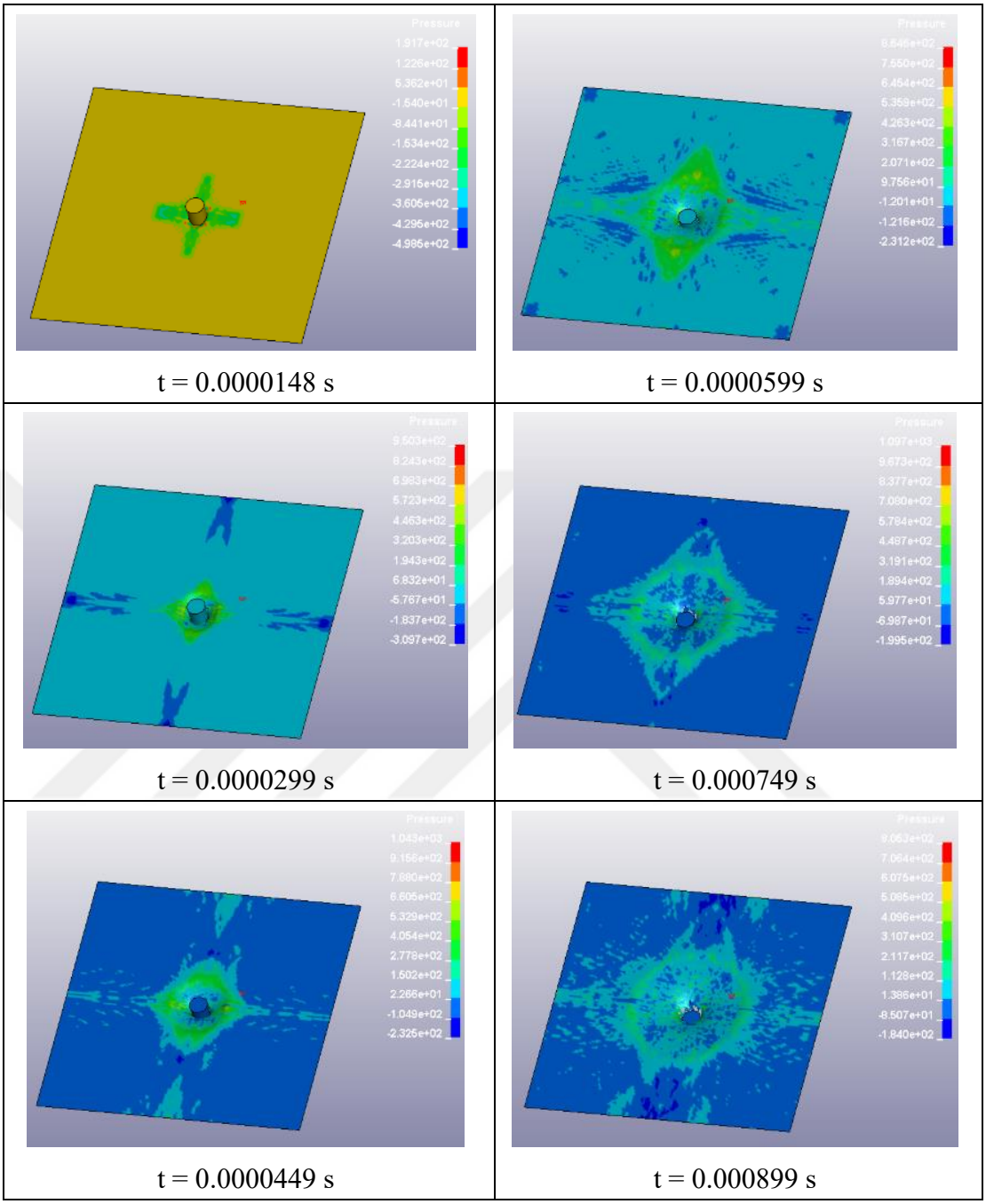
Artık hız, bir tehdidin zırha çarpıp tam penetrasyona sebep olup zırhın öbür tarafına geçtikten sonraki arta kalan hızı anlamına gelir. Bu hız, zırhın ne kadar enerji absorbe edebildiğinin de bir ölçütüdür. UHMWPE zırhın malzeme doğrulaması için artık hız çalışmaları yapılmıştır. 300x300x10 mm'lik UHMWPE bir plakaya, 20 mm ve 54 gr FSP çeşitli hızlarda ateşlenmiştir. Literatürden alınan ve Lambert-Jones analitik modeliyle çözümlenmiş olan bir artık hız çalışmasına nümerik olarak yakınsanmaya çalışılmıştır. Sonuçlar Tablo 8'de gösterildiği gibidir.

Başlık 1.1.6'da anlatılan Lambert-Jones analitik denklemleri için katsayılar ve değerler literatürden alınmıştır. Burada Recht-Ipson yaklaşımı için $p = 2.368$ ve $a = 0.998$ olarak alınmıştır [27].

Tablo 8. Bu çalışmadan elde edilen V_r artık hızlarının literatürde sayısal olarak bulunan ve analitik olarak hesaplanan V_r artık hız değerleri ile karşılaştırılması [27].

Balistik darbe hızı (m/s)	Lambert-Jones analitik çözümü V_r (m/s)	Bu çalışma V_r (m/s)
425	197.75	227
443	243	244
470	297.95	268
648	553.65	521

Lambert – Jones analitik denklemlerinden bulunan sonuçlarla birlikte nümerik model sonuçları sunulmuştur. Farklı hızlarda ateşlenen FSP'lerin zırhın tam penetrasyona uğramasından sonra arka yüzeye geçtiği andaki hızları tabloda verildiği gibidir. Burada analitik çözümle, nümerik çözüm arasındaki hata oranı %1 olarak bulunmuştur.

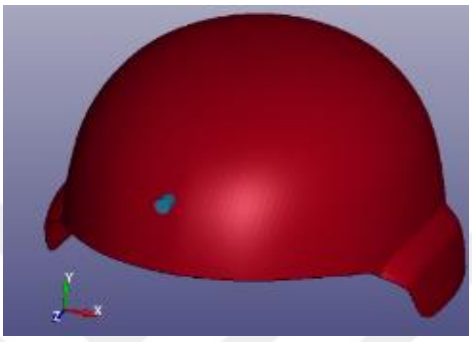
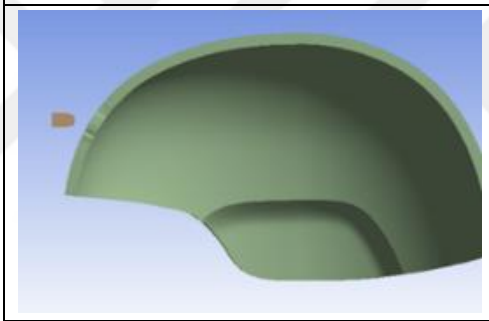
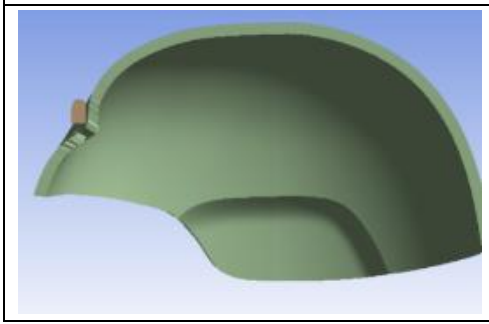


Şekil 30. UHMWPE plakalardaki basınç dağılımının zamanla değişimi

Şekil 30'da 20 mm'lik FSP'nin 648 m/s'de zırha çarpmasıyla birlikte oluşan zamana bağlı basınç dağılımları gösterilmiştir.

3.1.3. Kevlar ve UHMWPE Kaskların Balistik Performanslarının Karşılaştırılması

Balistik çalışmalar için bir kask geometrisi hazırlanmıştır. Ardından kabuk olarak ANSYS/ACP içerisinde kompozit modellenmiştir. 15 katman ve 6.8 mm kalınlıkta kompozit modellenen kaskın karşısından tehdit ateşlenmiştir. Modellenen kompozit kaska rijit 9 mm ve 8 gr parabellum NIJ 2 koruma seviyesinde ateşlenmiştir.

	Kask ve Tehdit pozisyonu
	Pozisyon 1
	Pozisyon 2

Şekil 31. Kask ve tehdidin birbirlerine göre pozisyonları

Şekil 31'de kask ve tehdit konumları gösterilmiştir. Kaska yapılan atış sonucu oluşan hasarlar, zamana bağlı basınç dağılımı ve künt travmaya sebep olan arka yüz deformasyonları incelenmiştir.

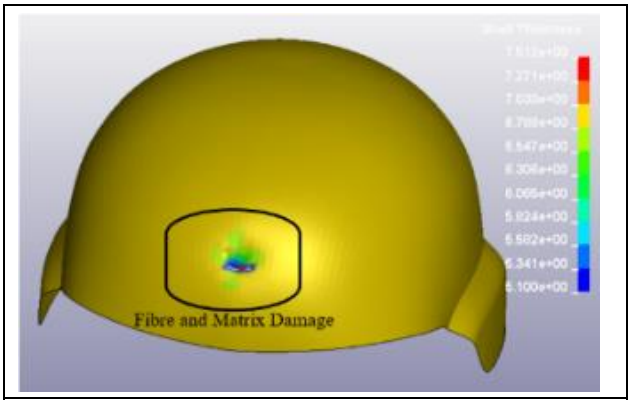
Hiçbir sönümleme elemanının kullanılmadığı balistik testlerde Kevlar kaskın dinamik deformasyonu 16.9 mm olarak ölçülmüştür. Tam bir penetrasyon gerçekleşmese de kompozit yapıda yanal hasar gözlemlenmiştir.

Kevlar kaskta meydana gelen kompozit hasar tipi, önceki çalışmalarda Kevlar kasklarda meydana gelen hasar tipine çok benzemektedir. Kalıcı deformasyon alanı eliptiktir.

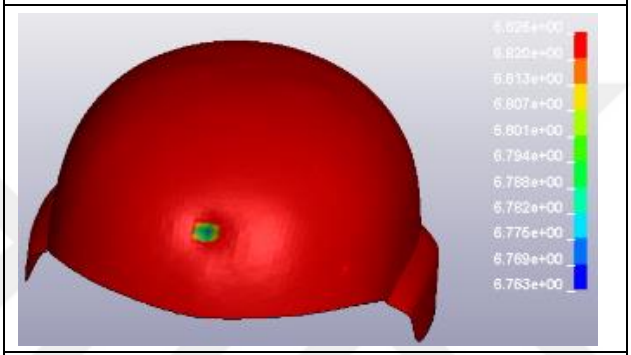
Tehdidin uç noktasının çarpmasıyla başlayan ani nokta basıncı, mermi ilerledikçe kask geometrisinde bir dağılım göstermektedir. Merminin enerjisi tükenene kadar, kask içindeki fiber eksenleri boyunca basınç dağılmaya devam etmiştir. Mermi durdurulduktan sonra çarpma bölgesi ve çevresindeki basınç tüm geometriye yayılarak azalmıştır. Burada oluşan anlık basınç nokta basıncıdır ve kask geometrisi boyunca dağılır.

NIJ II seviyesi balistik testler Kevlar kaskla aynı koordinat eksenine, geometriye, katman sayısına ve kalınlığa sahip bir UHMWPE balistik kaskta simüle edilmiştir. UHMWPE termoplastik esaslıdır ve güçlü liflere sahip çok hafif ve nispeten yumuşak bir malzemedir. UHMWPE kaskın dinamik arka yüz deformasyonu atıştan sonra 18.8 mm olarak ölçülmüştür. Ezilme ve deformasyon gözlemlenmiştir.

NIJ II standartlarına göre balistik atış sonrası UHMWPE kaskta zamanla oluşan basınç dağılımları Şekil 33'te gösterilmiştir. Tehdidin uç noktasının çarpmasıyla başlayan ani nokta basıncı, mermi ilerledikçe kask geometrisinde bir dağılım göstermektedir. Merminin enerjisi tükenene kadar kask içindeki lif eksenleri boyunca basınç dağılmaya devam etmiştir. Mermi durdurulduktan sonra, çarpma bölgesi ve çevresindeki basınç tüm geometriye yayılarak azalmıştır. UHMWPE kask tüm basıncı absorbe etmiş ve tam penetrasyon gözlenmemiştir. Maksimum nokta basınç değeri Kevlar kaskın maksimum basınç değerinden daha düşüktür.



a) Kevlar Kask

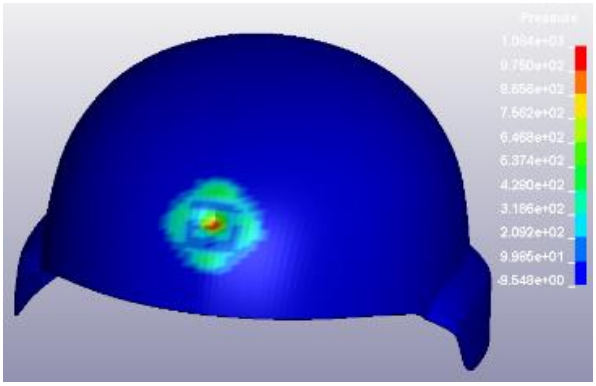
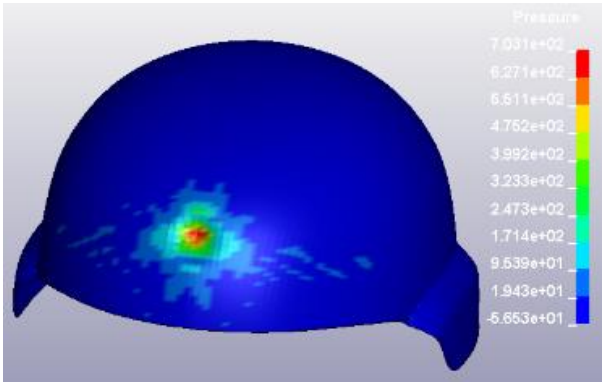
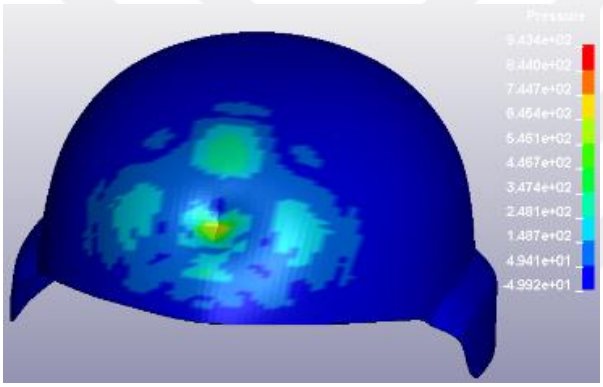
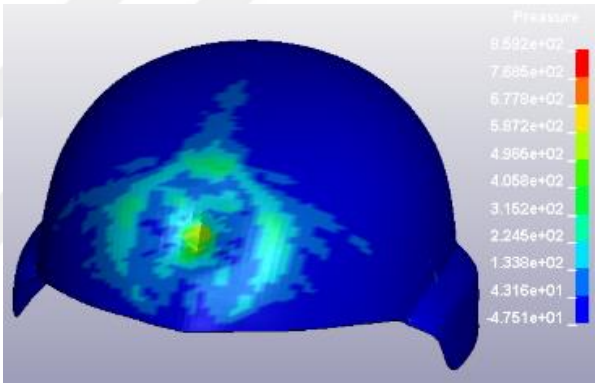
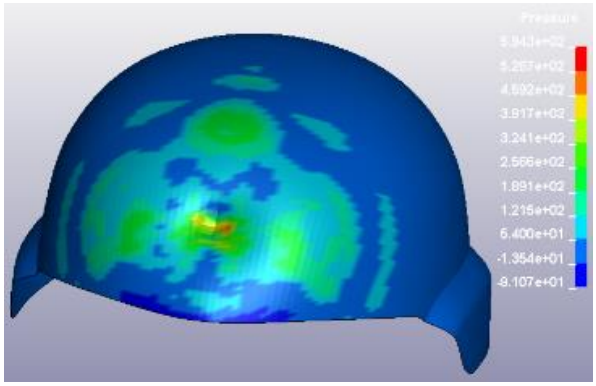
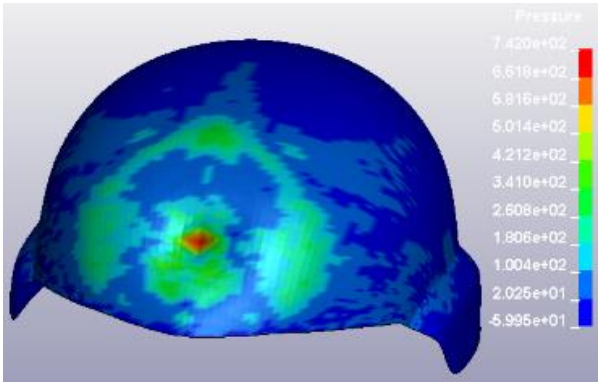


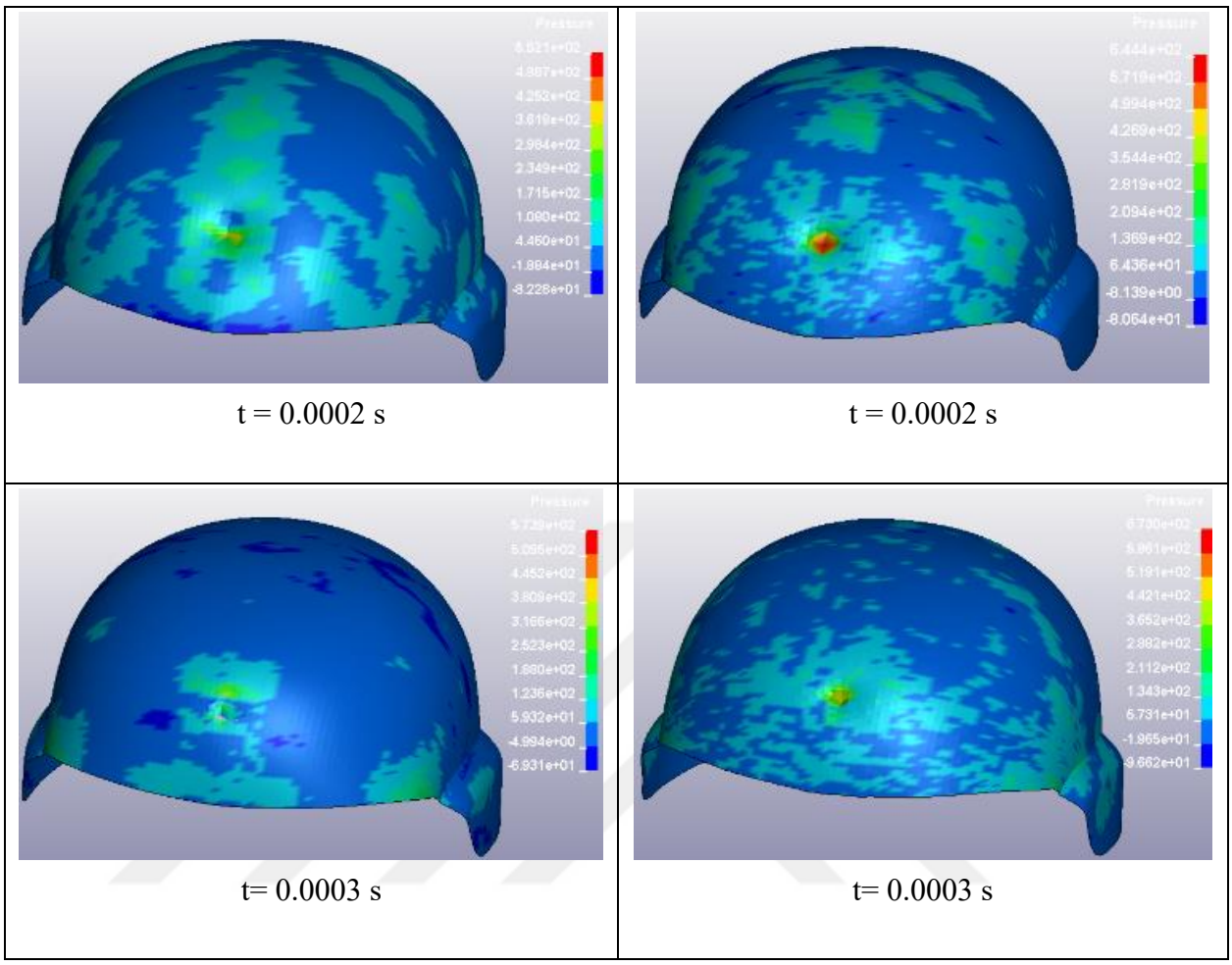
b) UHMWPE Kask

Şekil 32. Kevlar ve UHMWPE kaskta oluşan deformasyonlar

Analiz sonucunda hem Kevlar hem de UHMWPE kasklar belirtilen katman ve kalınlıkta NIJ II seviyesinde gerekli korumayı sağlamıştır. Her iki balistik kaskta da tam penetrasyon gerçekleşmemiştir. Dinamik arka yüz deformasyonu UHMWPE kaskta, Kevlar kaska göre biraz daha yüksek olarak gözlemlenmiştir. Tehdit, enerjisi tükenene kadar kaskın kabuğunu iter ve enerjisi tükendiğinde itmeyi durdurur. Bu deformasyon personelin kafatasına çarpana kadar devam ederse travmaya neden olur. Her iki kaskında dinamik deformasyonu 25 mm'den düşük bulunmuştur. Kaskların bu şartlar altında travmaya sebep olmayacağı söylenebilir.

UHMWPE kaskın daha düşük yoğunluğunun ve dolayısıyla daha düşük ağırlığının savaş alanında askeri personele önemli bir avantaj sağlayacağı söylenebilir. Yoğunluklar dikkate alındığında, UHMWPE kask aynı hacimdeki Kevlar kasktan %21,2 daha hafiftir. Ayrıca, Kevlar miğferde fiber ve matris hasarı ve kompozit ayrışması gözlenirken, UHMWPE miğferde bu durum gözlenmemiştir. Bu durum Şekil 32'de gösterildiği gibidir.

a) Kevlar Kask Basınç Dağılımı	b) UHMWPE Kask Basınç Dağılımı
	
t = 0.0000449 s	t = 0.0000449 s
	
t = 0.0000899 s	t = 0.0000899 s
	
t = 0.0001199 s	t = 0.0001199 s



Şekil 33. Kevlar ve UHMWPE kaskların balistik darbe etkisi altındaki basınç dağılımının zamana bağlı gösterimi

Tablo 9. Kevlar ve UHMWPE kaskların balistik performans karşılaştırması

Kasklar	Dinamik Travma (mm)	Tam Penetrasyon	Yoğunluk (kg/m^3)
Kevlar Kask	16.9	Kısmi Penetrasyon	1230
UHMWPE Kask	18.8	Kısmi Penetrasyon	970

Kevlar ve UHMWPE kaskların NIJ koruma seviyelerindeki balistik performansları ve koruma mekanizmaları analiz edilmiş ve karşılaştırılmıştır. İlk olarak, literatürden elde edilen deneysel verilerle STANAG standartlarına göre Kevlar plaka üzerinde bir balistik limit belirleme çalışması gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmanın sonuçları %4.64'lük bir hata payı ile yakınsamıştır. Kevlar modelinin doğrulanmasında 400x400x9.1 mm, 20 katmanlı kompozitlere 1.1 g FSP atışı yapılmıştır. Balistik limit 720 ± 10 m/s olarak bulunmuştur.

UHMWPE zırhın doğrulanmasında, daha önce geliştirilen analitik bir model ile yakınsama denenmiştir. Artık hız belirleme simülasyonlarında, 300x300x10 mm'lik bir plakaya 20 mm FSP ateşlenmiştir. Önceki analitik modele yakınsama %1'lik bir hata ile gerçekleşmiştir. Bu çalışma kapsamında oluşturulan sayısal modellerin doğruluğu Kevlar ve UHMWPE plakalar üzerinde yapılan çalışmalar ile kanıtlanmıştır.

Balistik kasklar, yeterince yakınsayan plaka zırhlardan sonra modellenmiştir. NIJ II seviyesinde, 8 g'lık bir FMJ tehdidi 358 m/s hızla kaskın ön tarafına ateşlenmiştir. Balistik kasklarda dinamik deformasyon ve kompozit hasar incelenmiştir. Her iki balistik kaskın zaman içindeki basınç değişimleri de hesaplanmış ve literatüre sunulmuştur. Kevlar kaskta 16.9 mm dinamik deformasyon meydana gelirken, geometri ayrılması, fiber ve matris hasarı gözlenmiştir. UHMWPE kaskta ise dinamik deformasyon 18.8 mm olarak ölçülmüş ancak Kevlar'da olduğu gibi kompozit hasarı gözlenmemiştir. Genel karşılaştırma Tablo 9'da sunulmuştur.

Sonuç olarak, her iki balistik kask da NIJ II seviyesinde koruma sağlamaktadır. Ancak UHMWPE miğferin çok düşük yoğunluğu nedeniyle Kevlar miğfere göre %21.2 daha hafif olması ve herhangi bir ayrılma gözlemlenmemesi, savaş alanlarında askeri personel için avantajlı olacağı sonucuna varılabilir.

3.2. UHMWPE Kask İçin Gerçekleştirilen Balistik Deneyler

NIJ-0106.01 standardına göre balistik kasklar tam teçhizatlı olarak hazırlanmıştır. Şekil 34'te gösterildiği üzere balistik kasklar atışa hazır hale getirilmiştir.



Şekil 34. Deneysel balistik kask



Şekil 35. Balistik kask ile deney düzeneğinin montajı

Balistik kask üretimi yapılıp teste hazırlandıktan sonra alüminyum 6061'den imal edilmiş NIJ kafa formuna Şekil 35'teki gibi oturtulmuştur. Alüminyum kafa formunun dört kulağı arası roma kili ile tamamen doldurulmuştur. Kilin insan yapısını tamamen simüle etmesi için 36-38 C'ye kadar ısıtması özel fırınlarda yapılmıştır.

Bir barut silahı standart gereği 5 metre mesafeden konumlandırılmıştır. NIJ III A seviyesi testleri için barut miktarı ayarlanmış 9 mm'lik tehdit barut silahının içine konulmuştur. Tamamen sabitlenen ve bağlanan kaska atış öncesi lazer işaretlemesi yapılmıştır.

Yüksek korunaklı balistik laboratuvarda kaskın farklı bölgeleri için atışlar teker teker yapılmış ve roma kilinin çöküntü derinlikleri kumpasla ölçülerek travma değerleri alınmıştır.



Şekil 36. Balistik atış öncesi ve sonrası kaskın görünümü

Balistik atışlar sonrası deforme olan tam teçhizatlı kaskın tüm lokasyonlardan ve içten görünümü Şekil 36'daki gibidir. Kaskta tam penetrasyon olmamış ve tüm tehditler kısmi penetrasyon ile durdurulmuştur. Kaskın çökmesinden kaynaklı travma değerleri balistik deney sonrası ölçülmüştür. Kaskta tam penetrasyon olmamasına rağmen sönüm sistemi (pad sistemi) zarar görmüştür.



Şekil 37. Kaska ön taraftan atış yapılması sonrası oluşan balistik deformasyon



Şekil 38. Kaska arka taraftan atış yapılması sonrası oluşan balistik deformasyon



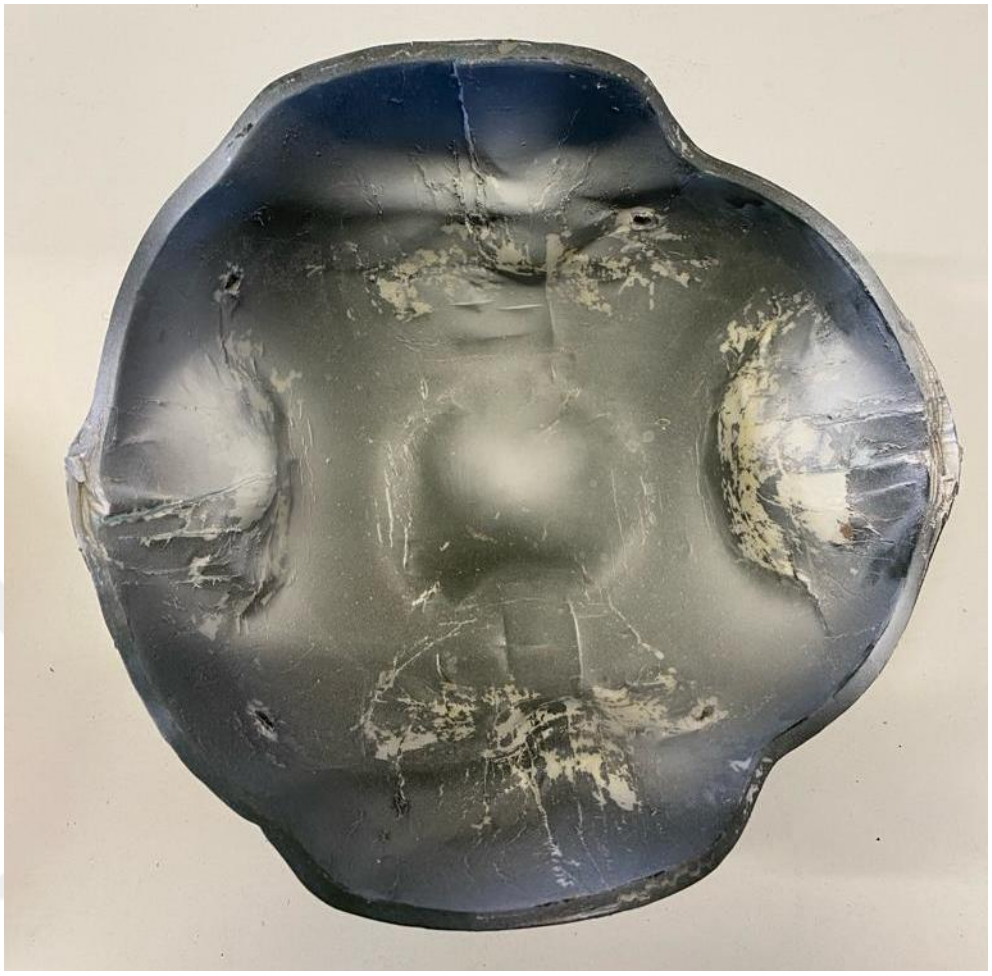
Şekil 39. Kaska sağ taraftan atış yapılması sonrası oluşan balistik deformasyon



Şekil 40. Kaska sol taraftan atış yapılması sonrası oluşan balistik deformasyon



Şekil 41. Kaska üst taraftan atış yapılması sonrası oluşan balistik deformasyon



Şekil 42. Kaskın balistik atışlar sonucunda toplam deformasyonun içten gösterilmesi



Şekil 43. 9 mm'lik FMJ'nin balistik darbe sonucu plastik deformasyonu

Sırasıyla Şekil 37, Şekil 38, Şekil 39, Şekil 40, Şekil 41 ve Şekil 42 gösterildiği üzere balistik kaskın ön, arka, sağ, sol ve üst bölgelerine atış yapılmıştır. Tam teçhizatlı 6.7 mm kalınlığındaki UHMWPE kask, kalibrasyonu yapılmış test sistemiyle NIJ III A koruma seviyesinde atışa maruz bırakılmıştır. Kaskın test edilen koruma seviyesi için başarısı kanıtlanmıştır. Kaskın içinden çıkartılan ve deformasyona uğrayan tehdit Şekil 43'te verildiği gibidir. Tablo 10'da balistik test raporu sunulmuştur. Burada tehdit hızları ışın perdeleri sayesinde okunmuştur.

Deneysel çalışmalar sonucu fiber-matris hasarları, delinme, delaminasyonlar ve arka yüz deformasyonu (travma miktarı) ölçülmüştür. Geniş (L) beden balistik kask tüm atışlarda ~25 mm'ye kadar travma göstermiştir. Balistik darbe hızları arasında çok fark olmamakla birlikte tehdit sapma açısı 0.5°'yi geçmemiştir. Doğrudan, dik açıyla yapılan atışlarda travmalar ve hasarlar arasındaki esas fark kaskın çok eğrilikli yapısından kaynaklanmaktadır. Eğimin ve açının her yönde değişmesi tehdidin davranışını lineer olmayan bir biçimde etkilemektedir. Aynı şekilde tehdidin davranışının değişmesi zırhında davranışını değiştirmektedir. Farklı bölgelerde oluşan travma farklılıkları zırhın delaminasyonu, katmanlar arası kayması ile yani zırhın davranışı ile doğrudan etkilidir.

Tehdidin zırh içindeki davranışını anlamak, balistik darbe etkisi altındaki kaskların penetrasyon mekaniğini çözümlemek için oldukça önemlidir. Bu sebepten ötürü kombine bir yaklaşım kullanılarak, kaskın aynı durum için bir nümerik modeli oluşturulmuş ve incelenmiştir. Sonuçları yakınsanan nümerik model üzerinde kaskın farklı merkezlerdeki atışları sonucu kaska oluşan hasar, delaminasyon, katmanlar arası kayma, travma değerleri, tehdidin zırh içerisindeki davranışı hem deneysel hem de sayısal çözümlenmiş ve anlaşılmıştır.

Tablo 10. Deneysel balistik rapor ve travma değerleri

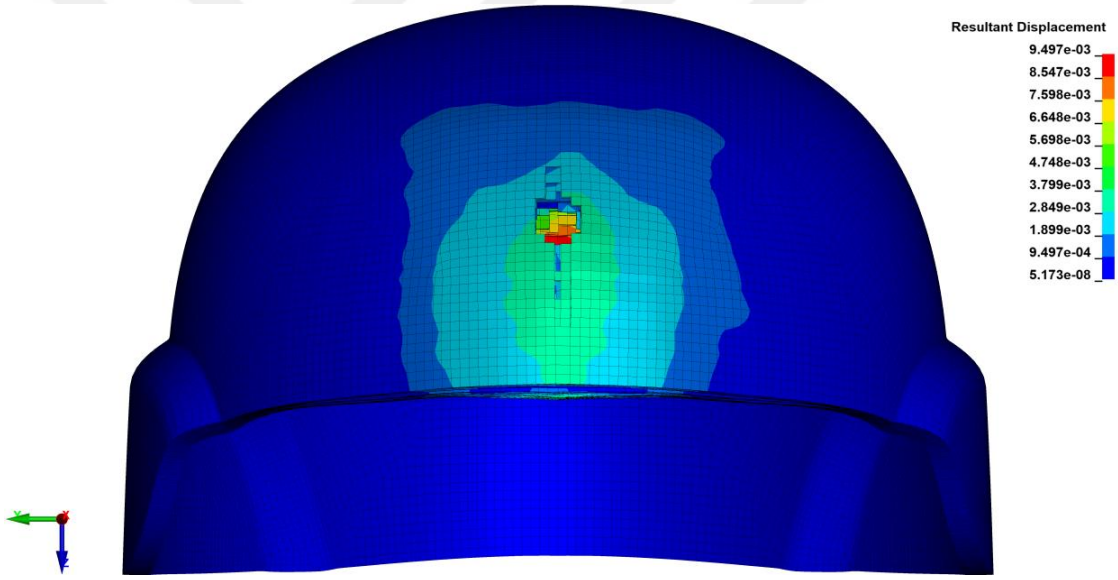
Atış	Darbe Hızı (m/s)	Penetrasyon (PP/CP)	Deformasyon (BFD)	Sapma Açısı	Kask Bölgesi
1	440.9	PP	19.70	0.5	Ön
2	445.7	PP	20.34	0.5	Arka
3	439.5	PP	17.39	0.5	Sol
4	444.7	PP	19.57	0.5	Sağ
5	446.9	PP	24.90	0.5	Üst

3.3. Balistik Kaskın Nümerik Çözümlenmesi

Balistik deneyler ışığında hasar mekanizmalarını anlamak ve çözümlemek için nümerik bir model oluşturulmuştur. Oluşturulan nümerik modelin 5 farklı bölgesine 9 mm FMJ deneyde olduğu gibi ateşlenmiştir.

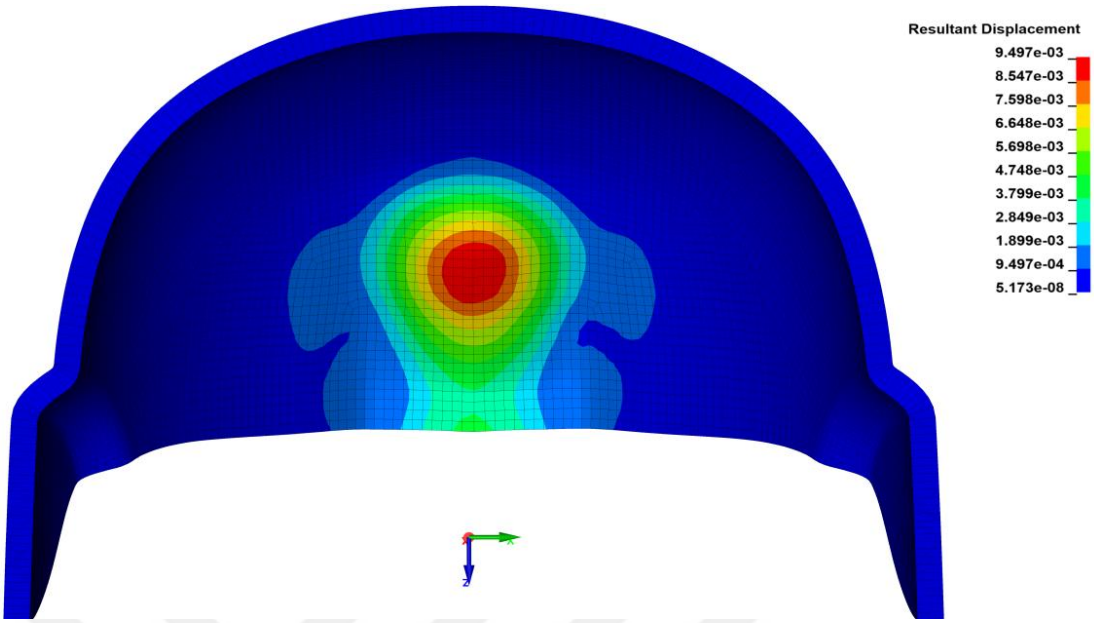
3.3.1. Balistik Kakın Ön Tarafına Atış Simülasyonu

Deneysel olarak balistik testleri gerçekleştirilen UHMWPE kaskın, ön tarafından balistik atış sonrası penetrasyon mekanizmalarını anlamak için bir sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur.



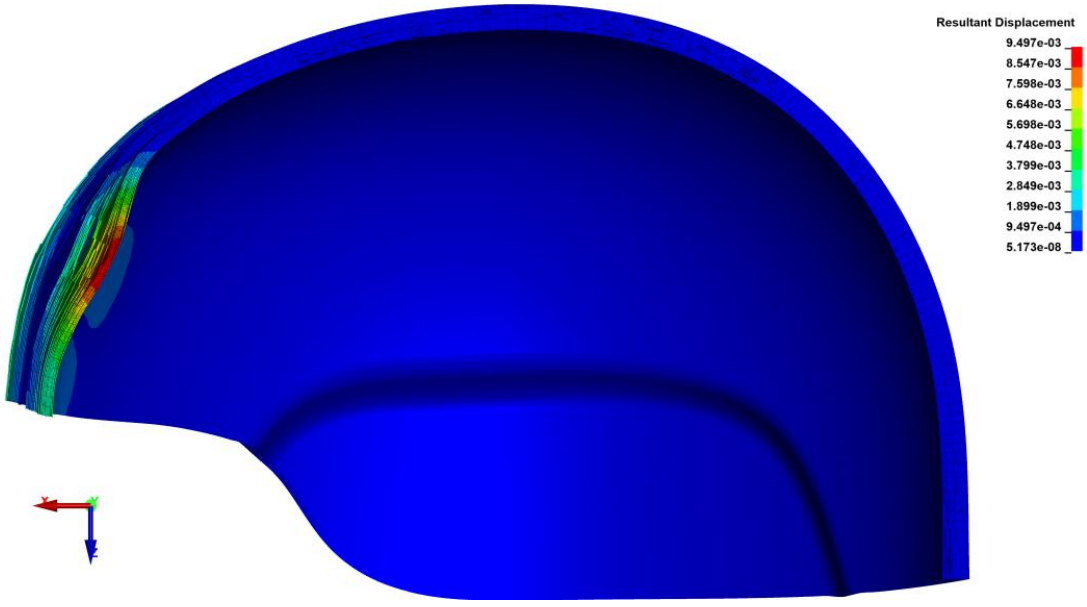
Şekil 44. Kaskın ön tarafına yapılan balistik atışın nümerik incelenmesi

Şekil 44'te gösterilen balistik darbe alan kaskın ön tarafı incelendiğinde kaskın tehdidin çarptığı noktada penetrasyonu görülmektedir. Şekil değişimi, kaskın alt açıklığına doğru artmakla beraber kısmi penetrasyona uğrayan kaskın tehdidin ilerlediği eksende en yüksek deformasyonu okunur. Bu değer 9.49 mm'dir. Kaskta dikey (z ekseni) boyunca yüzey yırtılmaları gözlemlenmiştir. Tehdidin penetre ettiği noktada ise hasar dairesel olarak ilerlemiştir. Kaskın ön alt kısmında gözlemlenen delaminasyon, katmanlar arası ayrılma ve kayma ise deneysel hasar ile birebir uyum göstermektedir.



Şekil 45. Kaskın ön tarafına yapılan balistik atışın sebep olduğu travmanın kaskın arkasından görünümü

Kask, ön atış sonrası arka kısmında şişmenin meydana gelmesi Şekil 45'te gösterildiği gibidir. Bu şişme arka yüz deformasyonu (BFD) olarak incelenir. Travma değeridir. Ayrıca sonuç incelendiğinde tehdidin arkadan çıkmadığı ve kısmi penetrasyon durumunun oluştuğu söylenir.



Şekil 46. Kaskın ön tarafına yapılan balistik atış sonrası oluşan delaminasyon

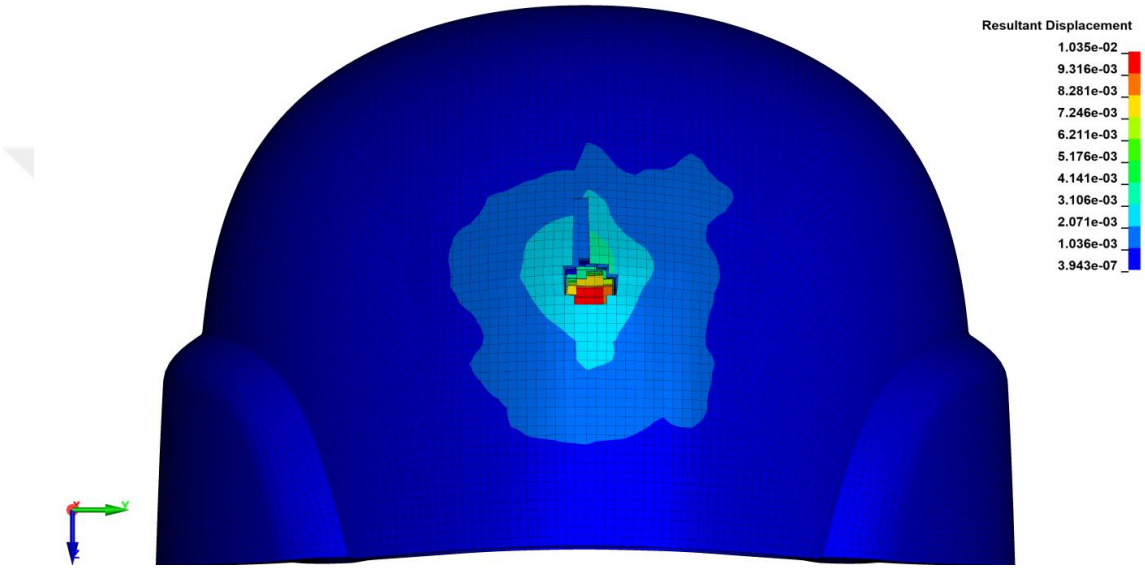


Şekil 47. Kaskın ön tarafına yapılan balistik atış sonrası oluşan delaminasyon 2

Gerçekleştirilen nümerik balistik atış sonucu kaskın ön tarafında tehdide bağlı bir hasar deliği oluşmuş ve kısmi penetrasyon meydana gelmiştir. Tehdit ilerledikçe kompozit laminalar hasara uğramış ve katmanlar arası delaminasyon gerçekleşmiştir. Balistik darbe ile ilk katmanlar yırtılıp ayrışırken tehdidin deforme olarak ilerlemesiyle delaminasyonlar meydana gelmiştir. Tehdidin katmanları kesemediği noktada ise tehdit arta kalan hızıyla sağlam kalan katmanları iterek hem travma deformasyonunu gerçekleştirmiş hem de delaminasyon hasarı devam etmiştir. Şekil 46 ve Şekil 47'de gösterildiği üzere delaminasyonların oluşumu ve tehdidin durdurulması gösterilmektedir. Ayrıca lokal ayrılmaların yanı sıra kaskın kesiti incelendiğinde, kaskın üst kısmında ve en arka kısmında da tehdit çarpmamasına rağmen delaminasyon hasarlarının gerçekleştiği söylenebilmektedir.

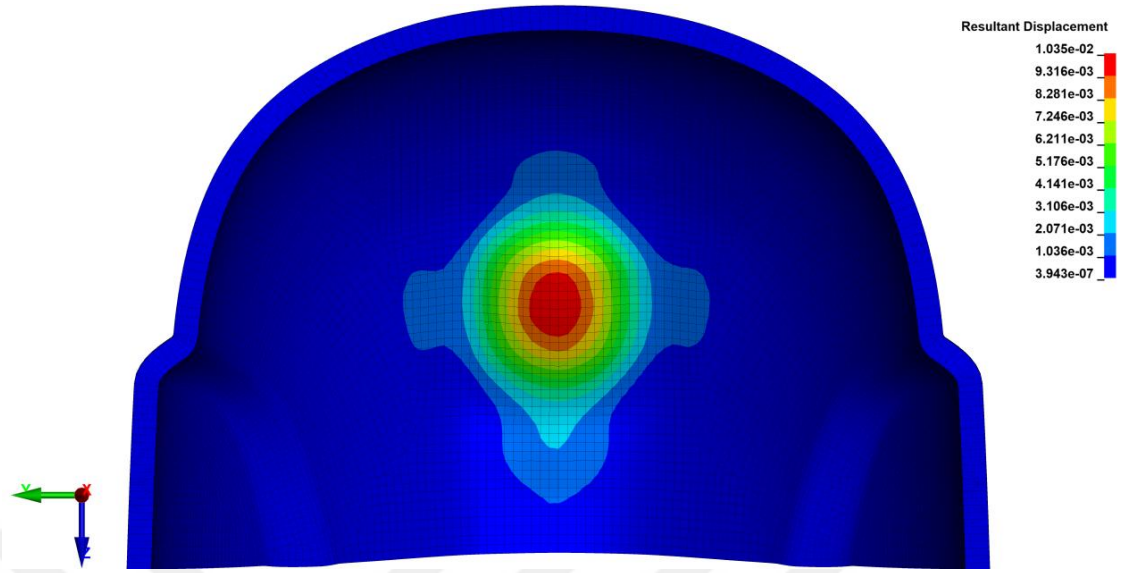
3.3.2. Balistik Kakın Arka Tarafına Atış Simülasyonu

Deneysel olarak balistik testleri gerçekleştirilen UHMWPE kaskın, arka tarafından balistik atış sonrası penetrasyon mekanizmalarını anlamak için bir sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur.



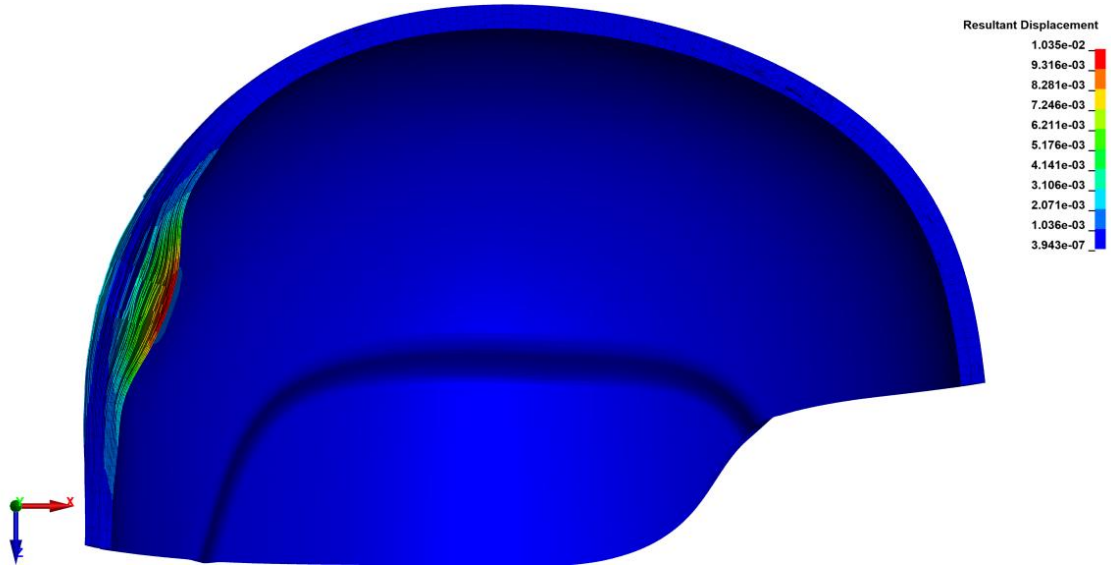
Şekil 48. Kaskın arka tarafına yapılan balistik atışın nümerik incelenmesi

Şekil 48'de gösterilen balistik darbe alan kaskın arka tarafı incelendiğinde kaskın tehdidin çarptığı noktada penetrasyonu görülmektedir. Şekil değişimi kaskın tehdidin çarptığı bölgede yoğunlaşmasıyla beraber kısmi penetrasyona uğrayan kaskın, tehdidin ilerlediği eksende en yüksek deformasyonu okunur. Bu değer 10.35 mm'dir. Kaskta dikey (z ekseni) boyunca yüzey yırtılmaları gözlemlenmiştir. Tehdidin penetre ettiği noktada ise hasar dairesel olarak ilerlemiştir.



Şekil 49. Kaskın arka tarafına yapılan balistik atışın sebep olduğu travmanın kaskın arkasından görünümü

Kask, arkadan atış sonrası Şekil 49'da gösterildiği üzere arka kısmında şişme meydana gelmiştir. Bu şişme arka yüz deformasyonu olarak incelenir. Travma değeridir. Ayrıca sonuç incelendiğinde tehdidin arkadan çıkmadığı ve kısmi penetrasyon durumunun oluştuğu söylenir.



Şekil 50. Kaskın arka tarafına yapılan balistik atış sonrası oluşan delaminasyon

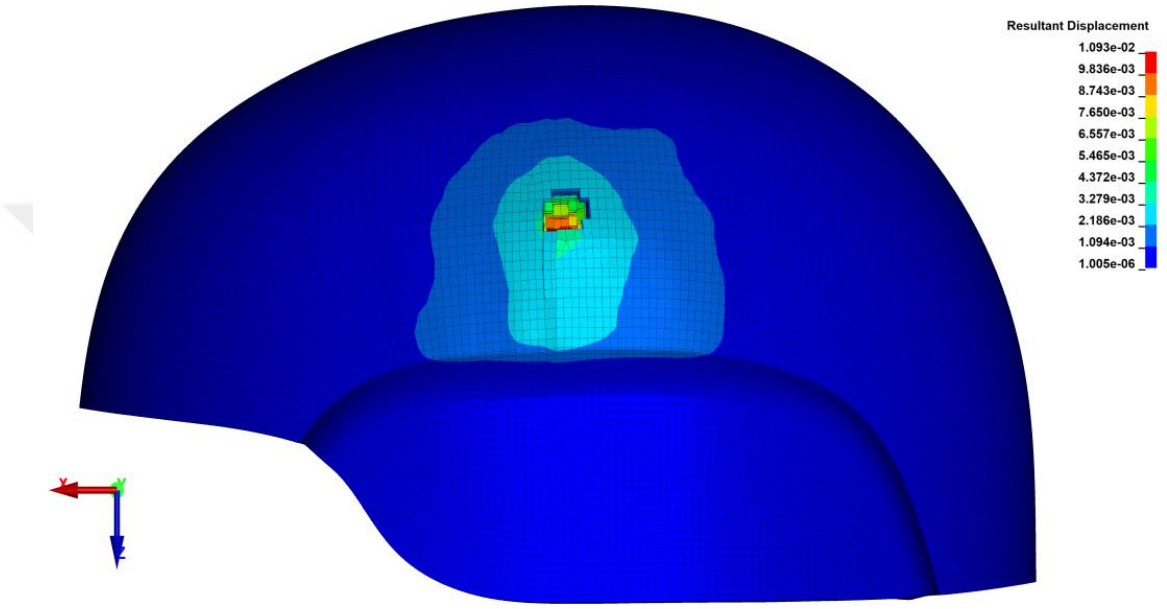


Şekil 51. Kaskın arka tarafına yapılan balistik atış sonrası oluşan delaminasyon 2

Gerçekleştirilen nümerik balistik atış sonucu kaskın arka tarafında tehdide bağlı bir hasar deliği oluşmuş ve kısmi penetrasyon meydana gelmiştir. Tehdit ilerledikçe kompozit laminalar hasara uğramış ve katmanlar arası delaminasyon gerçekleşmiştir. Balistik darbe ile ilk katmanlar yırtılıp ayrışırken tehdidin deforme olarak ilerlemesiyle delaminasyonlar meydana gelmiştir. Tehdidin katmanları kesemediği noktada ise tehdit arta kalan hızıyla sağlam kalan katmanları iterek hem travma deformasyonunu gerçekleştirmiş hem de delaminasyon hasarı devam etmiştir. Şekil 50 ve Şekil 51'de gösterildiği üzere delaminasyonların oluşumu ve tehdidin durdurulması gösterilmektedir. Ayrıca lokal ayrılmaların yanı sıra kaskın kesiti incelendiğinde, kaskın en ön kısmında tehdit çarpmamasına rağmen delaminasyon hasarlarının gerçekleştiği söylenebilmektedir. Kaskın arka alt kısmında ise katmanlar arası kaymalar yoğun olarak gözlemlenmiştir.

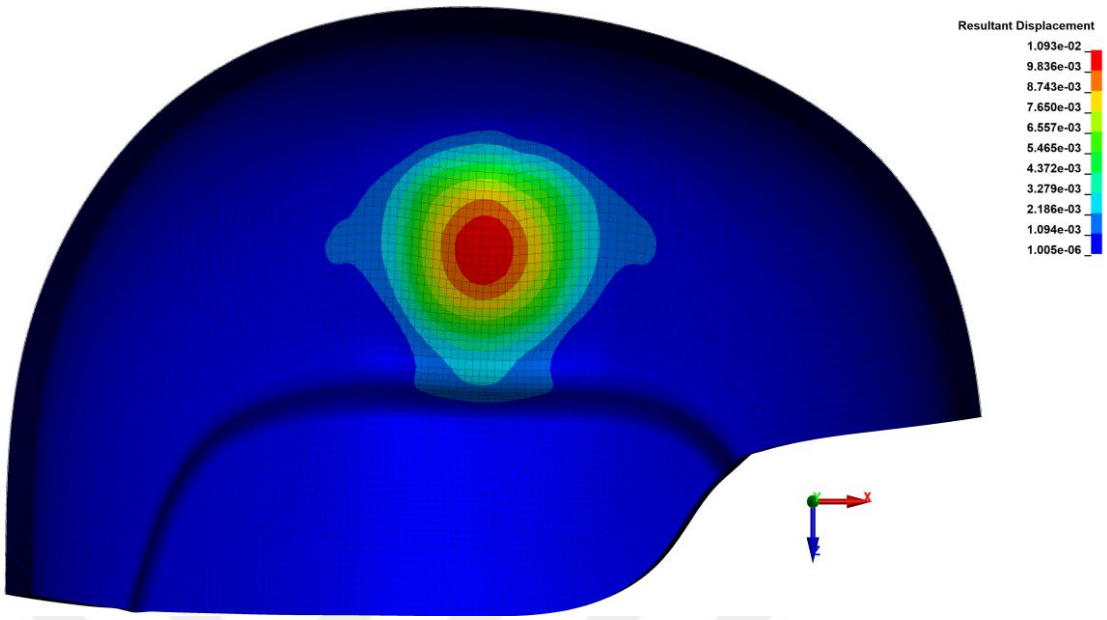
3.3.3. Balistik Kakın Sol Tarafına Atış Simülasyonu

Deneysel olarak balistik testleri gerçekleştirilen UHMWPE kaskın, sol tarafından balistik atış sonrası penetrasyon mekanizmalarını anlamak için bir sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur.



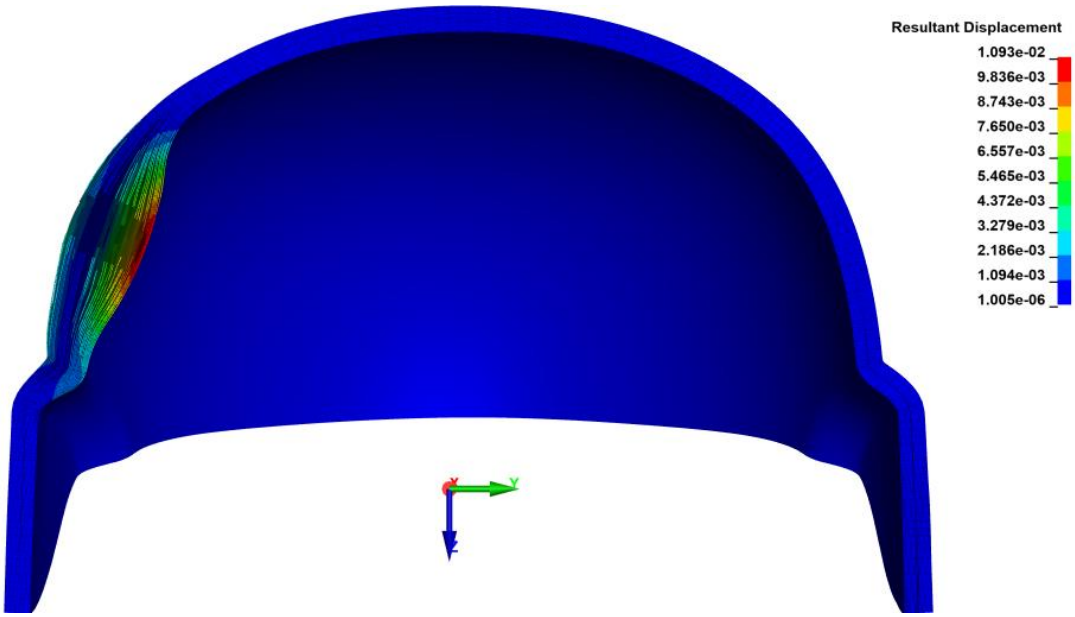
Şekil 52. Kaskın sol tarafına yapılan balistik atışın nümerik incelenmesi

Şekil 52'de gösterilen balistik darbe alan kaskın sol tarafı incelendiğinde kaskın tehdidin çarptığı noktada penetrasyonu görülmektedir. Şekil değişimi kaskın tehdidin çarptığı bölgede yoğunlaşmasıyla beraber kulak üstüne doğru yayılım gösterdiği görülebilmektedir. Kısmi penetrasyona uğrayan kaskın, tehdidin ilerlediği eksende en yüksek deformasyonu okunur. Bu değer 10.93 mm'dir. Kaskta dikey (z ekseni) boyunca yüzey yırtılmaları gözlemlenmiştir. Tehdidin penetre ettiği noktada ise hasar dairesel olarak ilerlemiştir.



Şekil 53. Kaskın sol tarafına yapılan balistik atışın sebep olduğu travmanın kaskın arkasından görünümü

Kask, soldan atış sonrası Şekil 53'deki arka kısmında şişme meydana gelmiştir. Bu şişme arka yüz deformasyonu olarak incelenir. Travma değeridir. Ayrıca sonuç incelendiğinde tehdidin arkadan çıkmadığı ve kısmi penetrasyon durumunun oluştuğu söylenir.



Şekil 54. Kaskın sol tarafına yapılan balistik atış sonrası oluşan delaminasyon

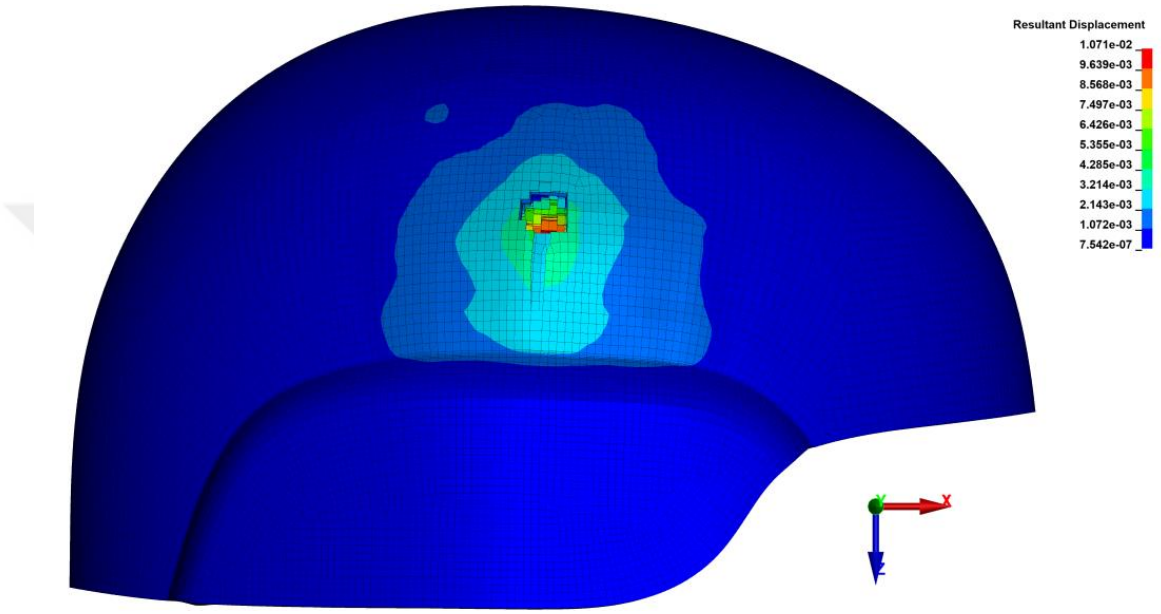


Şekil 55. Kaskın sol tarafına yapılan balistik atış sonrası oluşan delaminasyon 2

Gerçekleştirilen nümerik balistik atış sonucu kaskın sol tarafında tehdide bağlı bir hasar deliği oluşmuş ve kısmi penetrasyon meydana gelmiştir. Tehdit ilerledikçe kompozit laminalar hasara uğramış ve katmanlar arası delaminasyon gerçekleşmiştir. Balistik darbe ile ilk katmanlar yırtılıp ayrışırken tehdidin deforme olarak ilerlemesiyle delaminasyonlar meydana gelmiştir. Tehdidin katmanları kesemediği noktada ise tehdit arta kalan hızıyla sağlam kalan katmanları iterek hem travma deformasyonunu gerçekleştirmiş hem de delaminasyon hasarı devam etmiştir. Şekil 54 ve Şekil 55'te gösterildiği üzere delaminasyonların oluşumu ve tehdidin durdurulması gösterilmektedir. Ayrıca lokal ayrılmaların yanı sıra kaskın kesiti incelendiğinde, kaskın her iki kulağında ve kaskın tepe noktasında tehdit çarpmamasına rağmen delaminasyon hasarlarının gerçekleştiği söylenebilmektedir. Balistik darbenin gerçekleşmediği kaskın sol kulak tarafında katmanlar arası ayrılma net şekilde görülmektedir.

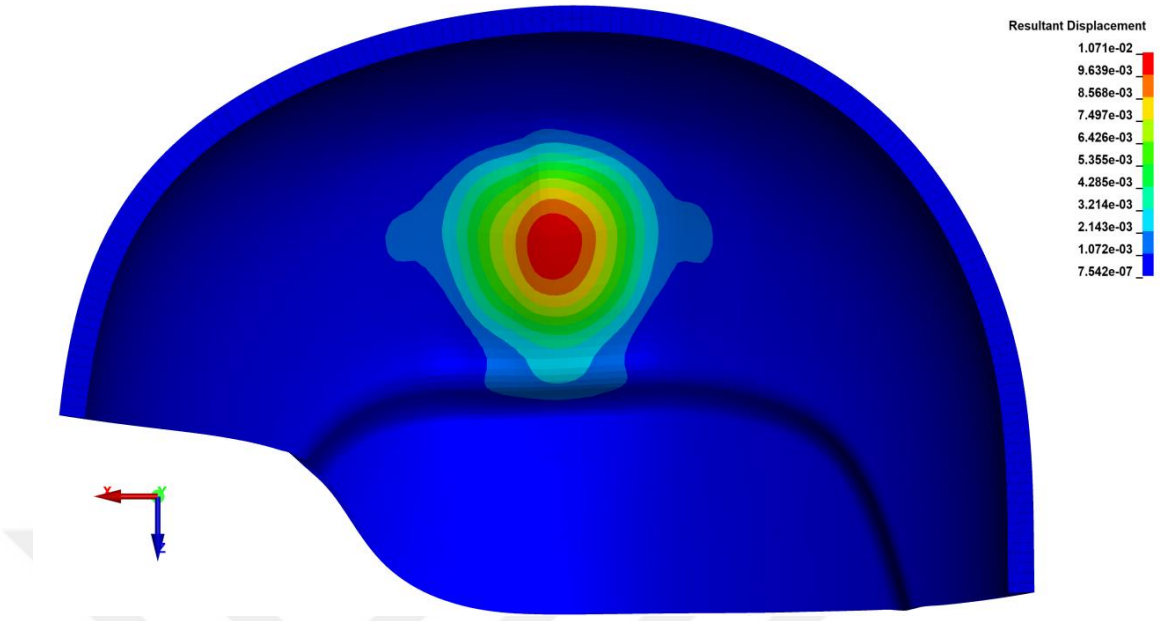
3.3.4. Balistik Kaskın Sağ Tarafına Atış Simülasyonu

Deneysel olarak balistik testleri gerçekleştirilen UHMWPE kaskın, sağ tarafından balistik atış sonrası penetrasyon mekanizmalarını anlamak için bir sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur.



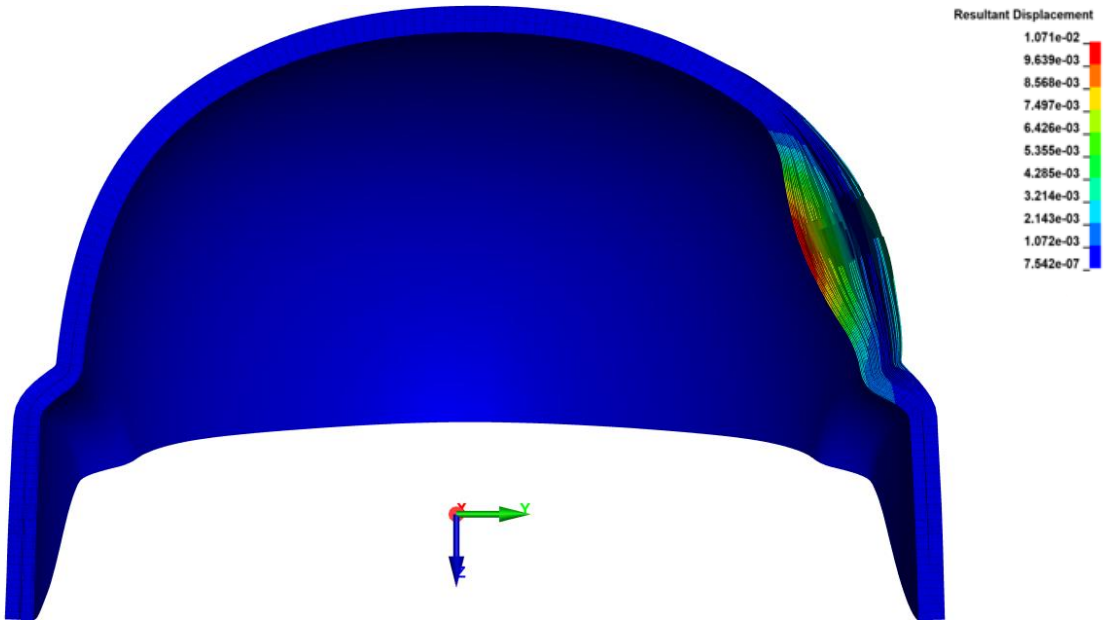
Şekil 56. Kaskın sağ tarafına yapılan balistik atışın nümerik incelenmesi

Şekil 56'da gösterilen balistik darbe alan kaskın sağ tarafı incelendiğinde kaskın tehdidin çarptığı noktada penetrasyonu görülmektedir. Şekil değişimi kaskın tehdidin çarptığı bölgede yoğunlaşmasıyla beraber kulak üstüne doğru yayılım gösterdiği görülebilmektedir. Kısmi penetrasyona uğrayan kaskın, tehdidin ilerlediği eksende en yüksek deformasyonu okunur. Bu değer 10.71 mm'dir. Kaskta dikey (z ekseni) boyunca yüzey yırtılmaları gözlemlenmiştir. Tehdidin penetre ettiği noktada ise hasar dairesel olarak ilerlemiştir.

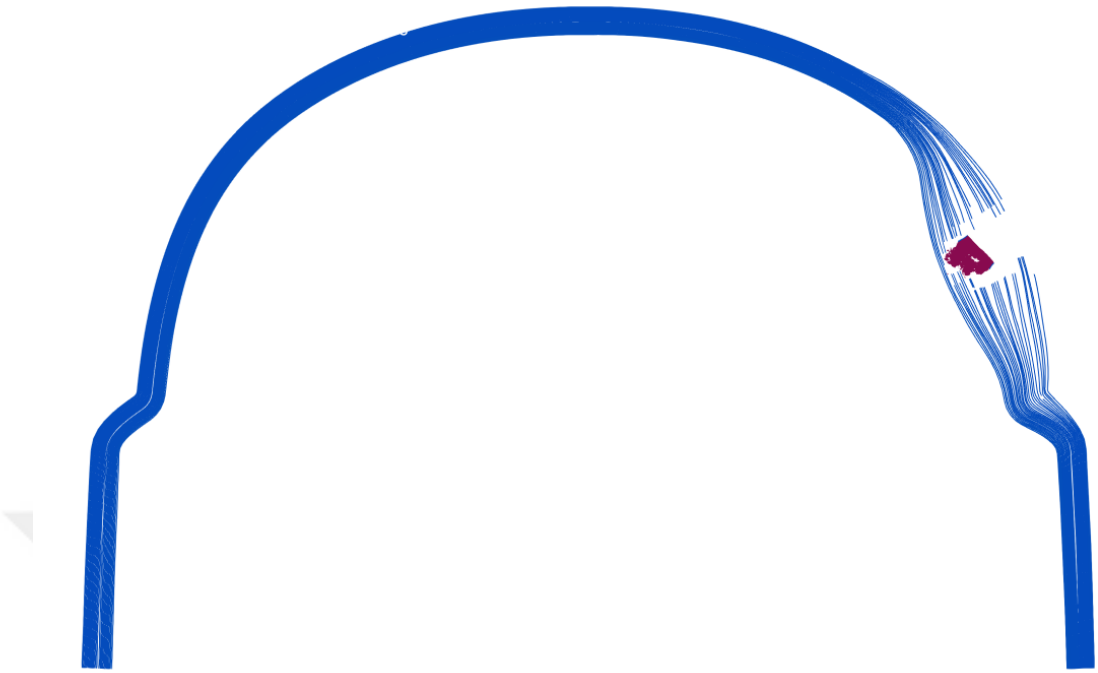


Şekil 57. Kaskın sağ tarafına yapılan balistik atışın sebep olduğu travmanın kaskın arkasından görünümü

Kask, sağdan atış sonrası Şekil 57'de gösterildiği gibi arka kısmında şişme meydana gelmiştir. Bu şişme arka yüz deformasyonu olarak incelenir. Travma değeridir. Ayrıca sonuç incelendiğinde tehdidin arkadan çıkmadığı ve kısmi penetrasyon durumunun oluştuğu söylenir.



Şekil 58. Kaskın sağ tarafına yapılan balistik atış sonrası oluşan delaminasyon

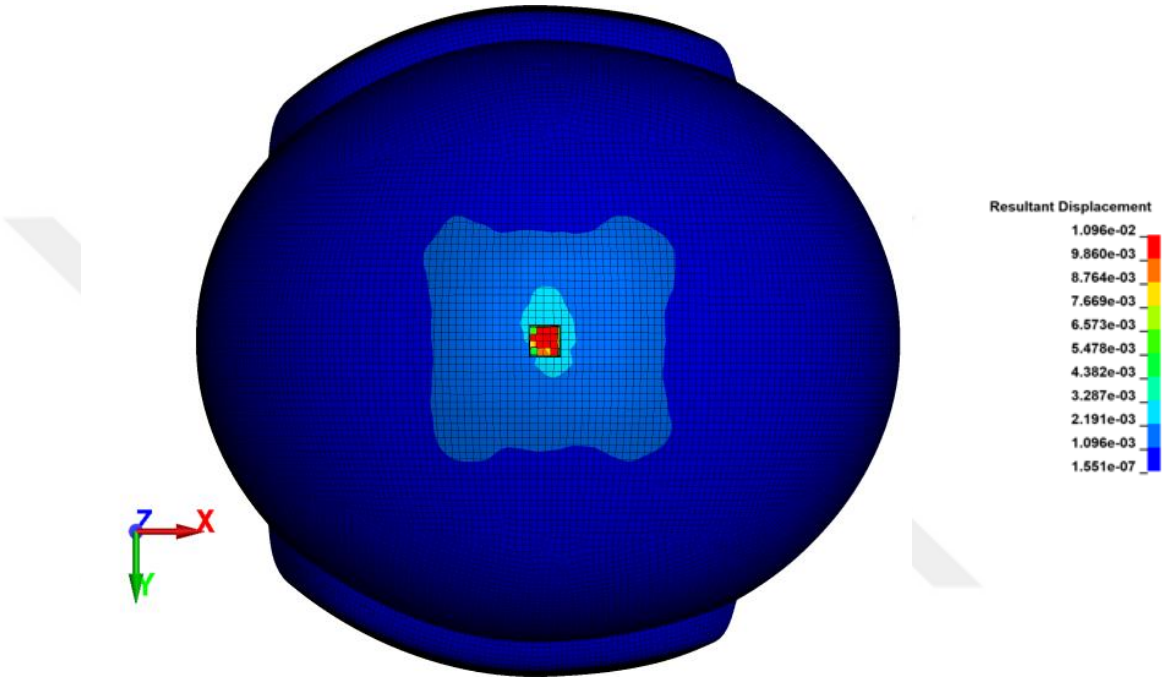


Şekil 59. Kaskın sağ tarafına yapılan balistik atış sonrası oluşan delaminasyon 2

Gerçekleştirilen nümerik balistik atış sonucu kaskın sağ tarafında tehdide bağlı bir hasar deliği oluşmuş ve kısmi penetrasyon meydana gelmiştir. Tehdit ilerledikçe kompozit laminalar hasara uğramış ve katmanlar arası delaminasyon gerçekleşmiştir. Balistik darbe ile ilk katmanlar yırtılıp ayrışırken tehdidin deforme olarak ilerlemesiyle delaminasyonlar meydana gelmiştir. Tehdidin katmanları kesemediği noktada ise tehdit arta kalan hızıyla sağlam kalan katmanları iterek hem travma deformasyonunu gerçekleştirmiş hem de delaminasyon hasarı devam etmiştir. Şekil 58 ve Şekil 59'da gösterildiği üzere delaminasyonların oluşumu ve tehdidin durdurulması gösterilmektedir. Ayrıca lokal ayrılmaların yanı sıra kaskın kesiti incelendiğinde, kaskın her iki kulağında ve kaskın tepe noktasında tehdit çarpmamasına rağmen delaminasyon hasarlarının gerçekleştiği söylenebilmektedir. Balistik darbenin gerçekleşmediği kaskın sol kulak tarafında katmanlar arası ayrılma net şekilde görülmektedir.

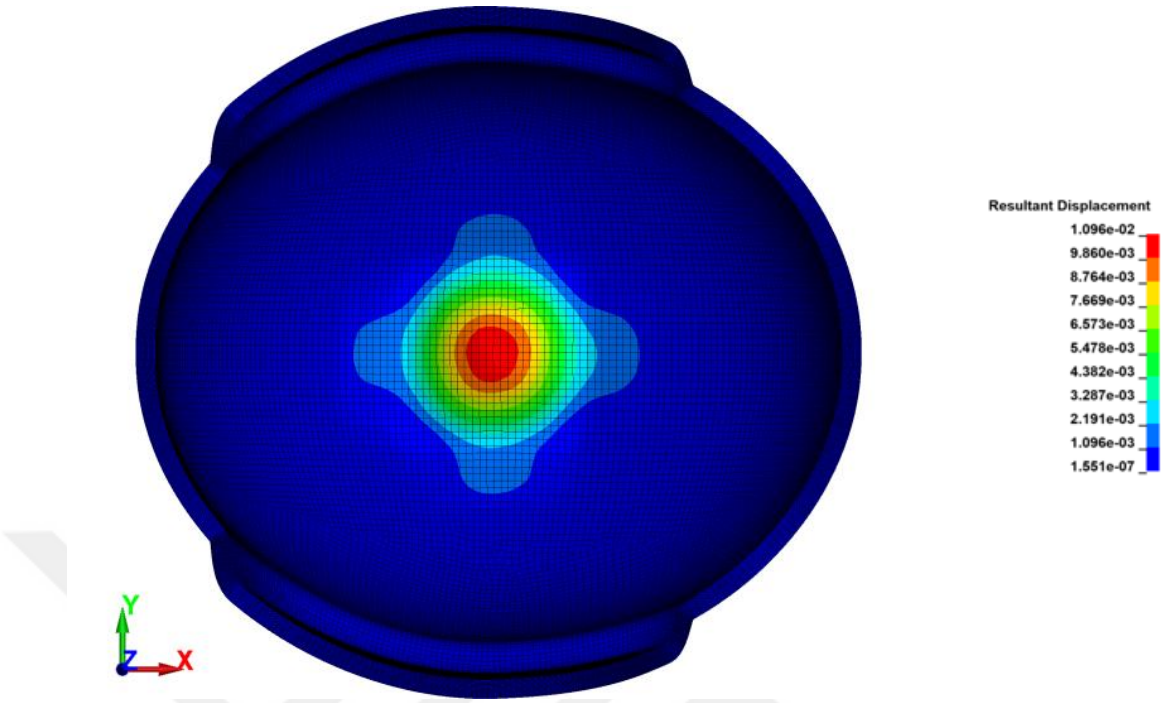
3.3.5. Balistik Kakın Üst Tarafına Atış Simülasyonu

Deneysel olarak balistik testleri gerçekleştirilen UHMWPE kaskın, üst tarafından balistik atış sonrası penetrasyon mekanizmalarını anlamak için bir sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur.



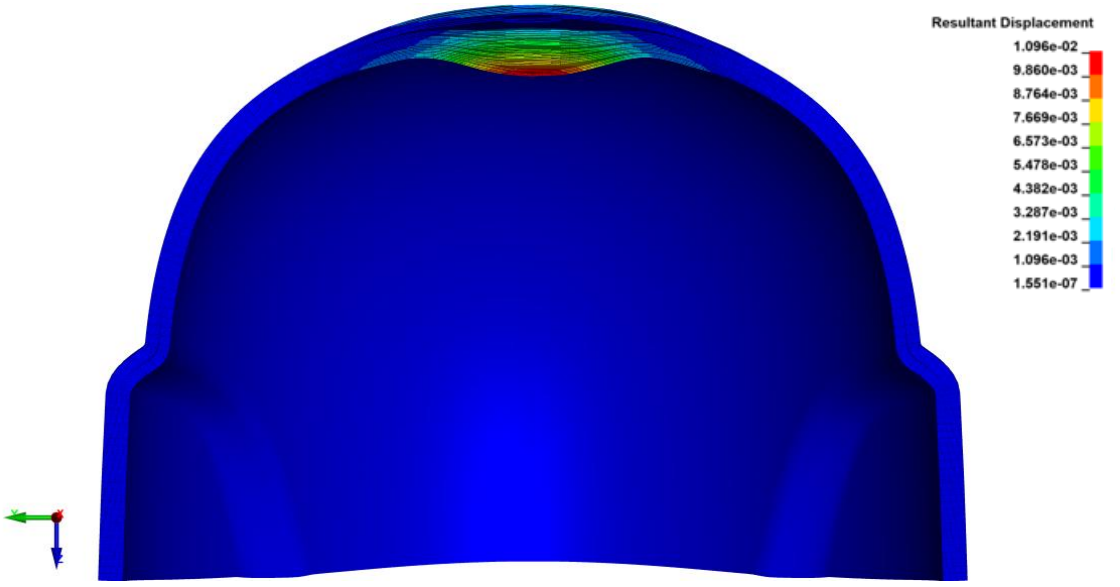
Şekil 60. Kaskın üst tarafına yapılan balistik atışın nümerik incelenmesi

Şekil 60'ta gösterilen balistik darbe alan kaskın üst tarafı incelendiğinde kaskın tehdidin çarptığı noktada penetrasyonu görülmektedir. Şekil değişimi kaskın tehdidin çarptığı bölgede yoğunlaşmasıyla beraber çarpı (X) şeklinde yayılım gösterdiği görülebilmektedir. Bu hasar şekli deneysel hasar ile doğrudan örtüşmektedir. Kısmi penetrasyona uğrayan kaskın, tehdidin ilerlediği eksende en yüksek deformasyonu okunur. Bu değer 10.96 mm'dir. Tehdidin penetre ettiği noktada hasar dairesel olarak ilerlemiştir.

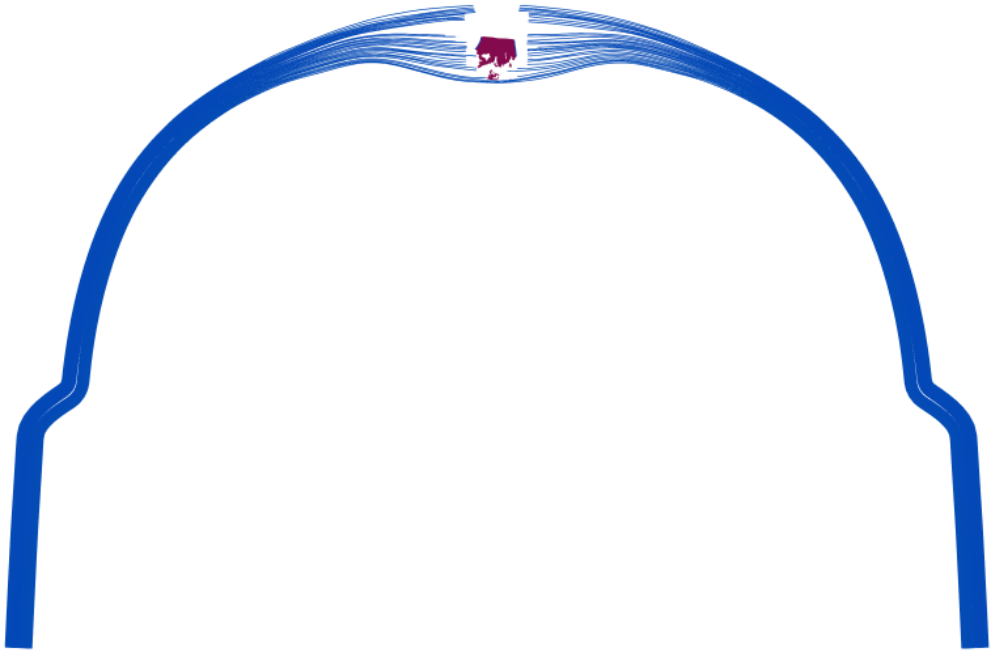


Şekil 61. Kaskın üst tarafına yapılan balistik atışın sebep olduğu travmanın kaskın arkasından görünümü

Kask, üstten atış sonrası Şekil 61'de gösterildiği gibi arka kısmında şişme meydana gelmiştir. Bu şişme arka yüz deformasyonu olarak incelenir. Travma değeridir. Ayrıca sonuç incelendiğinde tehdidin arkadan çıkmadığı ve kısmi penetrasyon durumunun oluştuğu söylenir.



Şekil 62. Kaskın üst tarafına yapılan balistik atış sonrası oluşan delaminasyon

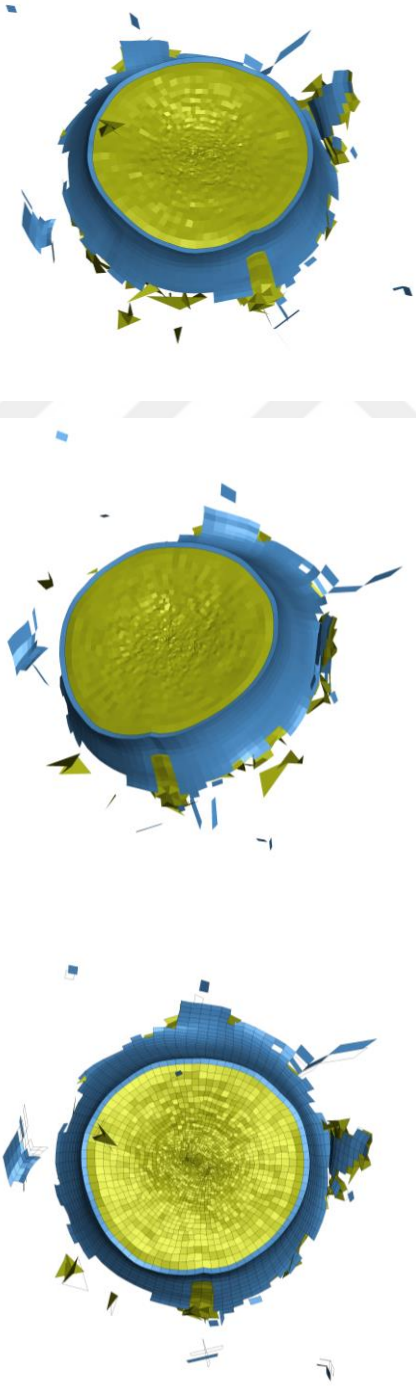


Şekil 63. Kaskın üst tarafına yapılan balistik atış sonrası oluşan delaminasyon 2

Gerçekleştirilen nümerik balistik atış sonucu kaskın üst tarafında tehdide bağlı bir hasar deliği oluşmuş ve kısmi penetrasyon meydana gelmiştir. Tehdit ilerledikçe kompozit laminalar hasara uğramış ve katmanlar arası delaminasyon gerçekleşmiştir. Balistik darbe ile ilk katmanlar yırtılıp ayrışırken tehdidin deforme olarak ilerlemesiyle delaminasyonlar meydana gelmiştir. Tehdidin katmanları kesemediği noktada ise tehdit arta kalan hızıyla sağlam kalan katmanları iterek hem travma deformasyonunu gerçekleştirmiş hem de delaminasyon hasarı devam etmiştir. Şekil 62 ve Şekil 63'te gösterildiği üzere delaminasyonların oluşumu ve tehdidin durdurulması gösterilmektedir. Ayrıca lokal ayrılmaların yanı sıra kaskın kesiti incelendiğinde, kaskın her iki kulağında ve kulak üstü noktasında tehdit çarpmamasına rağmen delaminasyon hasarlarının gerçekleştiği söylenebilmektedir.

3.3.6. Balistik Atış Sonrası Nümerik FMJ Deformasyonu

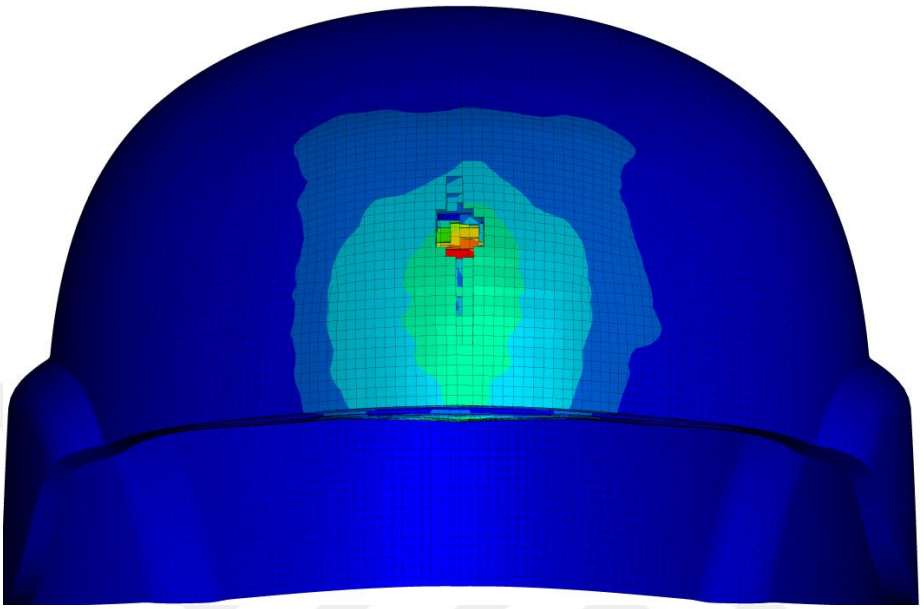
Balistik simülasyonlarda kaskla beraber tehdidinde sonlu elemanlar modeli oluşturulmuş ve incelenmiştir.



Şekil 64. Balistik atış sonrası FMJ plastik deformasyonu

Balistik atış sonrasında tehdit kask içerisinde ilerlerken plastik deformasyona uğramaktadır. Bu deformasyon tehdidin kılıfını ve çekirdeğini erozyona uğratarak meydana gelmektedir. Tehdidin kurşun çekirdeği ve pirinç kılıfı erozyona uğramış ve parçalanmıştır. Tehdidin ön tarafı tamamen parçalanmış ve mantarlaşma göstermiştir. Şekil 64'te nümerik balistik atış sonrası tehditte oluşan plastik deformasyon gösterilmiştir.

3.4. Balistik Deneylerin ve Simülasyonların Karşılaştırılması



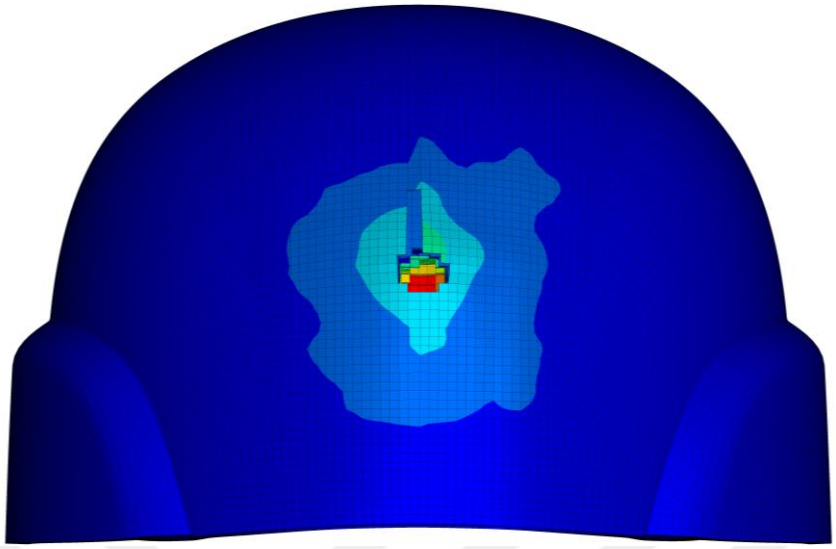
Ön taraftan gerçekleştirilen nümerik balistik atış sonrası hasarın gösterilmesi



Ön taraftan gerçekleştirilen deneysel balistik atış sonrası hasarın gösterilmesi

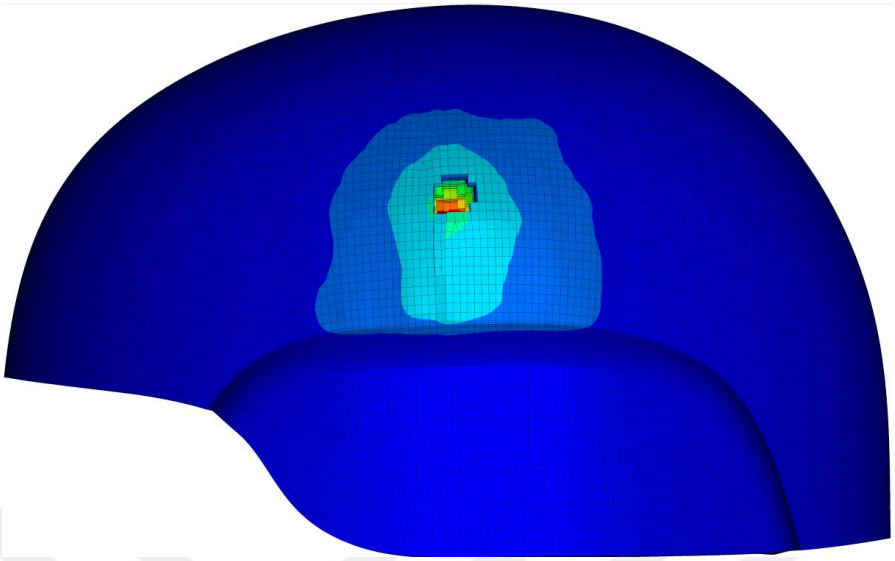
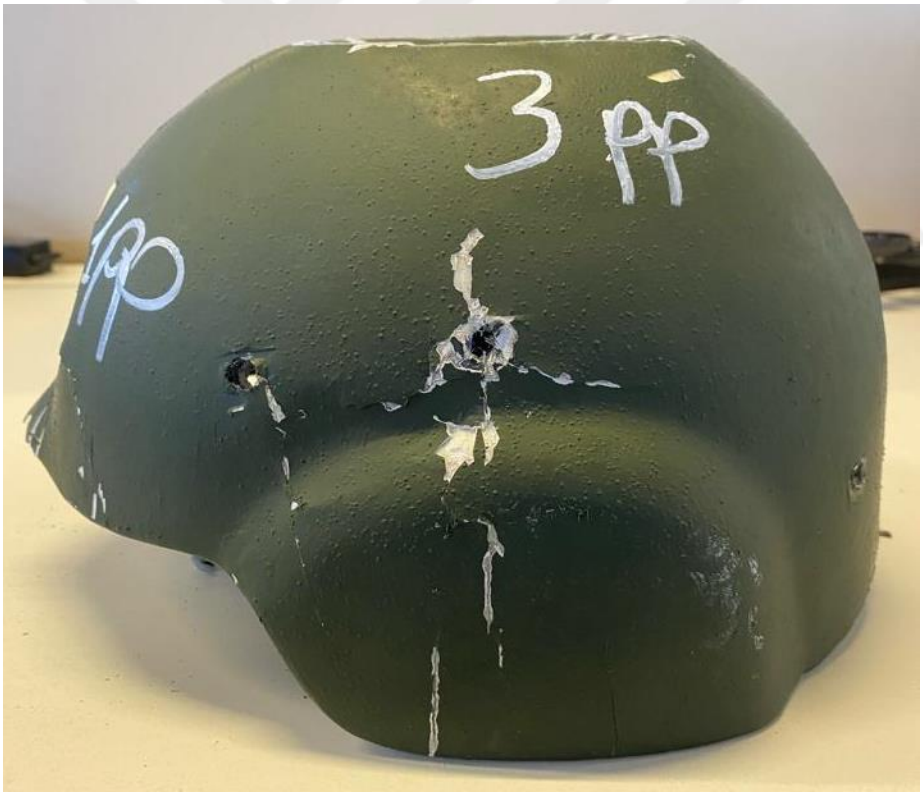
Şekil 65. Ön taraftan gerçekleştirilen balistik atış sonrası oluşan hasarın deneysel ve nümerik olarak karşılaştırılması

Şekil 65’te gösterildiği üzere balistik atış sonrası hasar mekanizması deneysel ve nümerik olarak gösterilmiştir. Nümerik modelde gözlemlenen dikey eksendeki yırtılma ve penetrasyon deliği deneysel sonuçlar ile uyuşmaktadır. Her ikisinde de kaskın alt kısmına doğru yırtılmalar gerçekleşmiştir. Ayrıca deneysel balistik atış sonrası kaskın ön alt kısmındaki delaminasyon ve katmanlar arası kaymalar nümerik modelde yakınsamıştır. Ancak deneysel kaskın yüzeyinde oluşan çökme ve yatay ayrışmalar nümerik modelde görülememektedir. Bunun en temel sebebi üretim sonrası ilave prosesler ve nümerik modelde kullanılan malzeme modeliyle ilgili olmasıdır.

	Arka taraftan gerçekleştirilen nümerik balistik atış sonrası hasar gösterilmesi
	Arka taraftan gerçekleştirilen deneysel balistik atış sonrası hasar gösterilmesi

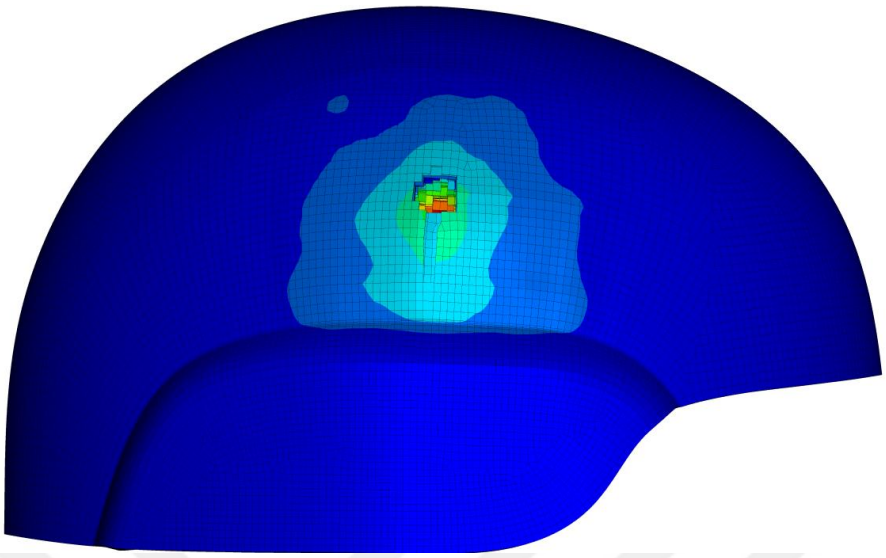
Şekil 66. Arka taraftan gerçekleştirilen balistik atış sonrası oluşan hasarın deneysel ve nümerik olarak karşılaştırılması

Şekil 66’da gösterildiği üzere balistik atış sonrası hasar mekanizması deneysel ve nümerik olarak gösterilmiştir. Nümerik modelde gözlemlenen şekil değişimi kontürleri incelendiğinde ve penetrasyon deliği incelendiğinde deneysel sonuçlarla nümerik sonuçların uyumlu olduğu görülmektedir. Ancak deneysel balistik atış sonrası meydana genelen radyal yırtılmalar ve kaskın alt kısmında belirgin bir şekilde oluşan delaminasyon ve katmanlar arası kayma nümerik modelde görülmemektedir. Bunun en temel sebebi üretim sonrası ilave prosesler ve nümerik modelde kullanılan malzeme modeliyle ilgili olmasıdır.

	Sol taraftan gerçekleştirilen nümerik balistik atış sonrası hasar gösterilmesi
	Sol taraftan gerçekleştirilen deneysel balistik atış sonrası hasar gösterilmesi

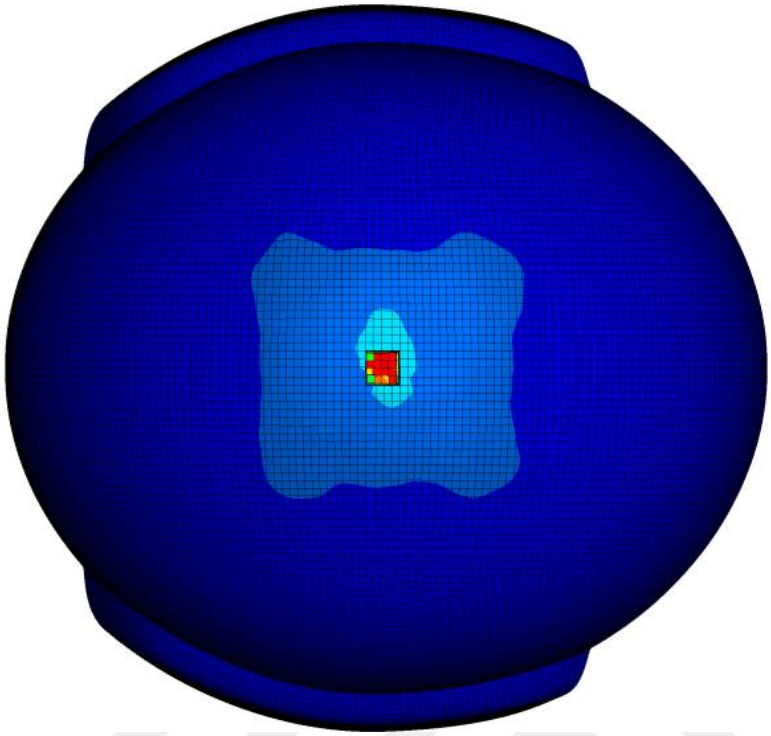
Şekil 67. Sol taraftan gerçekleştirilen balistik atış sonrası oluşan hasarın deneysel ve nümerik olarak karşılaştırılması

Şekil 67’de gösterildiği üzere balistik atış sonrası hasar mekanizması deneysel ve nümerik olarak gösterilmiştir. Burada deneysel balistik atış sonrası ve nümerik atış sonrası oluşan hasar mekanizmaları başarılı bir şekilde yakınsamıştır. Hem deneysel sonuçlarda hem de nümerik sonuçlarda yırtılmalar dikey eksende gerçekleşmiş, ciddi bir çöküntü meydana gelmemiştir. Penetrasyon modelleri birbirleriyle uyum göstermektedir.

	Sağ taraftan gerçekleştirilen nümerik balistik atış sonrası hasar gösterilmesi
	Sağ taraftan gerçekleştirilen deneysel balistik atış sonrası hasar gösterilmesi

Şekil 68. Sağ taraftan gerçekleştirilen balistik atış sonrası oluşan hasarın deneysel ve nümerik olarak karşılaştırılması

Şekil 68’de gösterildiği üzere balistik atış sonrası hasar mekanizması deneysel ve nümerik olarak gösterilmiştir. Burada deneysel balistik atış sonrası ve nümerik atış sonrası oluşan hasar mekanizmaları başarılı bir şekilde yakınsamıştır. Hem deneysel sonuçlarda hem de nümerik sonuçlarda yırtılmalar dikey eksende gerçekleşmiş, ciddi bir çöküntü meydana gelmemiştir. Penetrasyon modelleri birbirleriyle uyum göstermektedir.

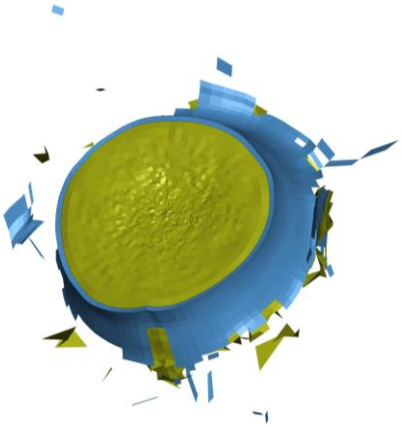
	Üst taraftan gerçekleştirilen nümerik balistik atış sonrası hasar gösterilmesi
	Üst taraftan gerçekleştirilen deneysel balistik atış sonrası hasar gösterilmesi

Şekil 69. Üst taraftan gerçekleştirilen balistik atış sonrası oluşan hasarın deneysel ve nümerik olarak karşılaştırılması

Şekil 69'da gösterildiği üzere balistik atış sonrası hasar mekanizması deneysel ve nümerik olarak gösterilmiştir. Burada deneysel balistik atış sonrası ve nümerik atış sonrası oluşan hasar mekanizmaları başarılı bir şekilde yakınsamıştır. Hem deneysel sonuçlarda hem de nümerik sonuçlarda şekil değişimi (deformasyon) çarpı (X) şeklinde gerçekleşmiştir. Ancak deneysel atış sonrası oluşan çöküntü nümerik modelde gözlemlenmemiştir. Bunun sebebi üretim sonrası ilave prosesler ve nümerik modelde kullanılan malzeme modeliyle ilgili olmasıdır.



Üst taraftan gerçekleştirilen nümerik balistik atış sonrası hasar gösterilmesi



Üst taraftan gerçekleştirilen deneysel balistik atış sonrası hasar gösterilmesi

Şekil 70. Üst taraftan gerçekleştirilen balistik atış sonrası oluşan hasarın deneysel ve nümerik olarak karşılaştırılması

Şekil 70'de gösterildiği üzere balistik atış sonrası tehditte oluşan plastik deformasyon deneysel ve nümerik olarak gösterilmiştir. Nümerik deformasyon ile deneysel deformasyon uyum göstermektedir. Her iki sonuçta da tehditte yırtılmalar ve mantarlaşma meydana gelmektedir. Deneysel sonuçlarda gözlemlenen mantarlaşmanın daha fazla olmasına rağmen nümerik modelde gözlemlenmeyen bu durumun sebebi nümerik modelin malzeme modelinden kaynaklıdır.

Tablo 11. Gerçekleştirilen deneysel ve nümerik balistik darbelerin travma sonuçlarının karşılaştırılması

ATIŞ	DARBE HIZI (m/s)	DENEYSEL TRAVMA (mm)	NÜMERİK TRAVMA (mm)	KASK BÖLGESİ
1	440.9	19.70	9.49	ÖN
2	445.7	20.34	10.35	ARKA
3	439.5	17.39	10.93	SOL
4	444.7	19.57	10.71	SAĞ
5	446.9	24.90	10.96	ÜST

Tablo 11'de deneysel balistik atışlar ile nümerik balistik atışların arka yüz deformasyonu (Travma) değerleri verilmiştir. Verilen balistik raporda kaskın ön, arka, sol, sağ ve üst kısmına balistik atış sonrası meydana gelen deformasyonlar toparlanmıştır. Deneysel veriler ile nümerik veriler arasındaki sapma üretim sonrası ilave prosesler ve nümerik modelde kullanılan malzeme modeliyle doğrudan ilgilidir.

4. BÖLÜM
TARTIŞMA-SONUÇ VE ÖNERİLER

4.1. Sonuçlar

UHMWPE kaskların balistik darbe etkisi altındaki davranışının çözümlendiği bu tez çalışması sayısal ve deneysel olarak iki aşamada gerçekleştirilmiş olup sayısal olarak elde edilen sonuçların deneysel çalışmalar ile doğruluğu ispatlanmaya çalışılmıştır. Nümerik çalışmalar, ANSYS/LSDYNA sonlu elemanlar programı ile Lagrangian yaklaşımı kullanılarak gerçekleştirilmiş olup, deneysel çalışmalar ise NIJ-0106.01 seviye IIIA koruma seviyesinde olacak şekilde bir barut silahı kullanılarak yapılmıştır.

Çalışmalara başlamadan önce bir ön çalışma yapılmıştır. Bu ön çalışmada balistiğin tüm önemli parametreleri kullanılmıştır. Lambert-Jonas analitik hesaplama yöntemi, STANAG 2920 balistik limit hesaplanması ve sonlu elemanlar çözüm metodu kullanılmıştır. Literatürden alınan deneysel balistik limit değerleriyle önce Kevlar zırh plakasının sonlu elemanlar modeli doğrulanmıştır. Ardından literatürdeki değerler ışığında Lambert-Jonas analitik hesaplamalarıyla UHMWPE zırh plakası için bir sonlu elemanlar modeli geliştirilmiştir. Doğrulanan Kevlar ve UHMWPE plaka modelleri üzerinden balistik kasklar modellenmiş ve aynı sınır şartları altında ağ optimizasyonu yapıldıktan sonra NIJ-0106.01 standardına göre balistik performansları incelenmiş ve karşılaştırılmıştır.

Deneysel çalışmalar için UHMWPE kaskın üretimi gerçekleştirilmiştir. Düzgün bir şekilde kesilen ve konumlandırılan UHMWPE prepregler sıcak preste sıcaklık ve basınç altında kürlenmiştir. Ardından CES İleri Kompozit Savunma Teknolojileri A.Ş.'ye ait akredite balistik laboratuvarında NIJ-0106.01 standardına göre balistik testleri gerçekleştirilmiştir. Bu testlerde kaskın deformasyonu ve travma değeri incelenmiştir.

UHMWPE kask 6.7 mm kalınlığında ve 28 laminadan üretilmiş ve modellenmiştir. UHMWPE, Dyneema HB 26 prepreglerinden üretilen kask hali hazırda askeri unsurlar tarafından kullanılan L beden kask olarak seçilmiştir. Katmanların katı olarak modellemesine istinaden katı kompozit laminaların davranışını modelleyebilmek için MAT_COMPOSITE_FAILURE_SOLID_MODEL malzeme modeli kullanılmıştır. Deneylerde olduğu gibi kaskın beş farklı bölgesine tam ceketli 9 x 19 mm tehditler ateşlenmiştir.

Çalışmalarda elde edilen sonuçlar şu şekildedir;

- Ön çalışmalarda, Kevların sonlu elemanlar modeliyle yapılan balistik limit çalışmasında, literatürden alınan 0.22 kalibrelik FSP ile balistik limiti deneysel olarak tespit edilen Kevlar plaka için geliştirilen sonlu elemanlar modeli %4.638 hata oranıyla 720 m/s olarak bulunmuştur. Aynı şekilde literatürden alınan Lambert-Jonas analitik denkleminden hesaplanan ve 20 mm FSP ile artık hız çalışması yapılan UHMWPE plakanın sonlu elemanlar modeli %1 hata oranı ile yakınsanmıştır. Geliştirilen nümerik modeller literatüre sunulmuştur.
- Ön çalışmalarda, doğrulanan Kevlar ve UHMWPE nümerik modelleri ile balistik kasklar modellenmiş ve karşılaştırılmıştır. Hiçbir sönümleme elemanının kullanılmadığı balistik testlerde Kevlar kaskın dinamik deformasyonu 16.9 mm olarak ölçülmüştür. Tam bir penetrasyon gerçekleşmese de Kevlar kaskta yanal hasar gözlemlenmiştir. NIJ II seviyesi balistik testler Kevlar kaskla aynı koordinat eksenine, geometriye, katman sayısına ve kalınlığa sahip bir UHMWPE balistik kask içinde simüle edilmiştir. UHMWPE kaskın dinamik arka yüz deformasyonu atıştan sonra 18.8 mm olarak ölçülmüştür. Ezilme ve deformasyon gözlemlenmiştir. Tehdidin uç noktasının çarpmasıyla başlayan ani nokta basıncı, mermi ilerledikçe kask geometrisinde bir dağılım göstermektedir. Merminin enerjisi tükenene kadar kask içindeki lif eksenleri boyunca basınç dağılmaya devam etmiştir. Mermi durdurulduktan sonra, çarpma bölgesi ve çevresindeki basınç tüm geometriye yayılarak azalmıştır. UHMWPE kask tüm basıncı absorbe etmiş ve tam penetrasyon gözlenmemiştir. UHMWPE kaskta maksimum nokta basınç değeri Kevlar kaskın maksimum basınç değerinden daha düşüktür.

- Ön çalışmalarda, kasklar arası basınç dağılımı süre ve büyüklük olarak incelendiğinde UHMWPE kaskın Kevlar kaska göre daha iyi basıncı dağıttığı görülmüştür.
- Balistik testlerde UHMWPE kaskın NIJ IIIA koruma seviyesinde başarılı olduğu gözlemlenmiştir. Roma Plastina kili kullanılarak travma ölçümleri yapılmıştır. Tehdidin kaska dik olarak balistik darbe gerçekleştirdiği testlerde 440.9 m/s hız ile kaskın ön kısmına tehdidin çarpması sonucu 19.7 mm, 445.7 m/s ile kaskın arka kısmına tehdidin çarpması sonucu 20.34 mm, 439.5 m/s ile kaskın sol kısmına tehdidin çarpması sonucu 17.39 mm, 444.7 m/s ile kaskın sağ kısmına tehdidin çarpması sonucu 19.57 mm, 446.9 m/s ile kaskın üst kısmına tehdidin çarpması sonucu 24.90 mm travma değerleri ölçülmüştür.
- Gerçekleştirilen balistik testlerde UHMWPE kaskın 9 mm FMJ ile balistik darbe etkisi altındaki deformasyon ve hasar tipleri gözlemlenmiştir. Meydana gelen kısmi penetrasyon, penetrasyon deliği, delaminasyonlar, arka yüz travmaları ve fiberlerin hasar şekilleri incelenmiştir.
- Kask içinden çıkarılan tehdidin plastik deformasyonu ve hasarı incelenmiştir. Tehdidin mantarlaşma ile başlayan hasarı tamamen yassılaşana kadar devam etmiştir. Tehdidin üzerinde yırtılmalar ve ayrılmalar gözlemlenmiştir.
- Balistik deneyleri yapılan UHMWPE kask için nümerik bir model oluşturulmuştur. Oluşturulan nümerik model deneysel kaskın üretim parametrelerini birebir içermektedir. Nümerik model için deneysel şartlara bağlı balistik atışlar gerçekleştirilmiştir. Tehdidin kaska dik olarak balistik darbe gerçekleştirdiği testlerde 440.9 m/s hız ile kaskın ön kısmına tehdidin çarpması sonucu 9.49 mm, 445.7 m/s ile kaskın arka kısmına tehdidin çarpması sonucu 10.35 mm, 439.5 m/s ile kaskın sol kısmına tehdidin çarpması sonucu 10.93 mm, 444.7 m/s ile kaskın sağ kısmına tehdidin çarpması sonucu 10.71 mm, 446.9 m/s ile kaskın üst kısmına tehdidin çarpması sonucu 10.96 mm travma değerleri ölçülmüştür.
- Balistik deneyleri gerçekleştirilen UHMWPE kaskın nümerik modeli ile deneysel olarak gözlemlenmesi zor olan delaminasyonlar ve tehdidin zırh içerisindeki hareketi gözlemlenmiştir.

- UHMWPE kask için gerçekleştirilen balistik deneyler ile nümerik simülasyon sonuçları karşılaştırılmıştır. Penetrasyon delik çapı, penetrasyon şekli, arka yüz deformasyonu şekli, delaminasyon ve katmanlar arası kayma, deneysel sonuçlar göz önüne alındığında nümerik sonuçlarla uyumlu olduğu görülmüştür.
- Nümerik balistik atış sonrası tehditte meydana gelen parçalanma ve yassılaşma gibi plastik deformasyon şeklinin deneysel sonuçlarla uyum içinde olduğu görülmüştür.

4.2. Öneriler

- Balistik deneyler sonucu ciddi bir şekilde deformasyona uğrayan kask düzgün bir şekilde kesilemeyeceği için delaminasyonlar fiziksel olarak gözlemlenememiştir. Her biri özdeş kasklara ayrı ayrı atış yapılarak ve doğru teçhizatlarla kesim işlemi yapılarak kasklardaki iç deformasyonlar ve delaminasyonlar fiziksel olarak gözlemlenebilir.
- Hibrit katmanlamalar ve farklı kumaş kombinasyonları ile travma değerleri azaltılmaya çalışılabilir.
- Bu çalışmada Lagrangian yaklaşımları kullanılmıştır. Tehdit deformasyonu ve kompozit hasarın daha gerçekçi modellenebilmesi için Euler yaklaşımlı bir çözüm geliştirilebilir.
- NIJ-0106.01 standardına göre incelenen deneysel kask için balistik limit çalışmaları yapılabilir. Nümerik modeli oluşturulabilir.
- Deneysel ve sayısal çalışmalar için farklı tehditlerle bir çalışma yapılabilir.
- Farklı malzeme modelleri ile nümerik modeller geliştirilerek deneyseldeki hasar durumu farklı malzeme modelleriyle incelenebilir.

KAYNAKÇA

1. Utracki, Leszek A., 2010. rigid ballistic composites (review of literature), NRC Publications Archive

2. Giray, M. Bailey, S. 2019 ‘‘Developments In Lightweight Composite Ballistic Helmet Manufacture’’, *Güvenlik Bilimleri Dergisi, IDEF özel sayı,* 79-94

3. Li, Y., Fan, H., & Gao, X. L., 2022. Ballistic helmets: Recent advances in materials, protection mechanisms, performance, and head injury mitigation. **Composites Part B: Engineering,** 238, 109890.

4. DoD numbers for traumatic brain injury: worldwide totals 2000-2021 Q2, as of August 26, 2021. (Web sayfası: https://health.mil/Military-Health-Topics/Centers-of-Excellence/Traumatic-Brain-Injury-Center-of-Excellence/DOD-TBI-Worldwide-Numbers), Erişim Tarihi: 4 Aralık 2022

5. Zhang, T. G., Satapathy, S. S., Vargas-Gonzalez, L. R., & Walsh, S. M. 2015., Ballistic impact response of ultra-high-molecular-weight polyethylene (UHMWPE). **Composite structures, 133,** 191-201.

6. SUPACAT (Web sayfası: (https://supacat.com/wp-content/uploads/sites/3/2015/07/Supacat_SPV-400_Data-Sheet_V1.0.pdf),), (Erişim tarihi: Temmuz 2023).

7. Sozen, E., Gunduz, G., & İmren, E. 2016., Balistik panel ve koruyucu zırh üretiminde kullanılan lif ve kompozit malzemeler. **Bartın Orman Fakültesi Dergisi, 18(2),** 194-204.

8. Gilson, L., Imad, A., Rabet, L., & Coghe, F. 2020. On analysis of deformation and damage mechanisms of DYNEEMA composite under ballistic impact. **Composite Structures, 253,** 112791.

9. Yong, M., Iannucci, L., & Falzon, B. G. 2010., Efficient modelling and optimisation of hybrid multilayered plates subject to ballistic impact. **International journal of impact engineering, 37**(6), 605-624.

10. Shen, Z., Hu, D., Yang, G., & Han, X. 2019., Ballistic reliability study on SiC/UHMWPE composite armor against armor-piercing bullet**. Composite Structures, 213**, 209-219.

11. Tanoğlu, M., & Seyhan, A. T. 2003., Investigating the effects of a polyester preforming binder on the mechanical and ballistic performance of E-glass fiber reinforced polyester composites. **International Journal of Adhesion and Adhesives, 23**(1), 1-8.

12. Güneş R., Reddy J.N., Arslan K., Aydın M., ‘‘Fonksiyonel Kademelendirilmiş Sandiviç Plakaların Balistik Darbe Etkisi Altında Lineer Olmayan Mekanik Analizleri’’ Erciyes Üniversitesi, Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi, Dış Kaynaklı Projeler İçin Acil İhtiyaç Projesi, Kayseri 2015

13. Hakan, M. 2017. ‘‘Fonksiyonel Kademelendirilmiş Plakaların Farklı Mermi Çarpma Açılarında Balistik Limitlerinin Araştırılması’’, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi

14. L. H. Nguyen, 2015. ‘‘The Ballistic Performance of Thick Ultra High Moleculer Weight Polyethylene Composite’’ Doctor of Philosophy Tesis, College of Science Engineering and Health, RMIT University.

15. Alarçin, S. 2020. Ultra Yüksek Yoğunluklu Polietilen ve Karbon Fiber Hibrit Kompozitlerin Balistik Dayanımının İncelenmesi. **Technological Applied Sciences, 15**(3), 29-40.

16. Karahan, M., Jabbar, A., & Karahan, N. 2015., Ballistic impact behavior of the aramid and ultra-high molecular weight polyethylene composites. **Journal of Reinforced Plastics and Composites, 34**(1), 37-48.

17. Hazzard, M. K., Trask, R. S., Heisserer, U., Van Der Kamp, M., & Hallett, S. R. 2018., Finite element modelling of Dyneema® composites: From quasi-static rates to ballistic impact. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 115**, 31-45.

18. Talebi, H., Wong, S. V., & Hamouda, A. M. S. 2009., Finite element evaluation of projectile nose angle effects in ballistic perforation of high strength fabric. **Composite Structures, 87**(4), 314-320.

19. Scazzosi, R., Manes, A., & Giglio, M. 2019., An enhanced material model for the simulation of high-velocity impact on fiber-reinforced composites**. Procedia Structural Integrity, 24**, 53-65.

20. Nguyen, L. H., Lässig, T. R., Ryan, S., Riedel, W., Mouritz, A. P., & Orifici, A. C. 2016. A methodology for hydrocode analysis of ultra-high molecular weight polyethylene composite under ballistic impact. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 84,** 224-235.

21. Asemani, S. S., Liaghat, G., Ahmadi, H., Anani, Y., Khodadadi, A., & Charandabi, S. C. 2021., The experimental and numerical analysis of the ballistic performance of elastomer matrix Kevlar composites. **Polymer Testing, 102,** 107311.

22. Rubio, I., Rodríguez-Millán, M., Marco, M., Olmedo, A., & Loya, J. A. 2019., Ballistic performance of aramid composite combat helmet for protection against small projectiles. **Composite Structures, 226,** 111153.

23. Rodríguez-Millán, M., Ito, T., Loya, J. A., Olmedo, A., & Miguélez, M. H. 2016., Development of numerical model for ballistic resistance evaluation of combat helmet and experimental validation. **Materials & Design, 110,** 391-403.

24. Tham, C. Y., Tan, V. B. C., & Lee, H. P. 2008., Ballistic impact of a KEVLAR® helmet: Experiment and simulations. **International Journal of Impact Engineering, 35**(5), 304-318.

25. Palta, E. Hongbing, F. Weggel, D.C. 2018., Finite element analysis of the Advanced Combat Helmet under various ballistic impacts. **İnternational Journal of Impact Engineering, 112,** 125-143.

26. Coghe, F. Dodd, B. 2015. ‘‘Damage caused to metals by kinetic and chemical energy projectiles’’ Light-Weight Armour for Defence & Security

27. Zhang, R., Qiang, L. S., Han, B., Zhao, Z. Y., Zhang, Q. C., Ni, C. Y., & Lu, T. J. 2020. Ballistic performance of UHMWPE laminated plates and UHMWPE encapsulated aluminum structures: Numerical simulation. **Composite Structures, 252,** 112686.

28. Shen, Z., Hu, D., Yang, G., & Han, X. 2019., Ballistic reliability study on SiC/UHMWPE composite armor against armor-piercing bullet. **Composite Structures, 213,** 209-219.

29. Daungkumsawat, J., Okhawilai, M., Charoensuk, K., Prastowo, R. B., Jubsilp, C., Karagiannidis, P., & Rimdusit, S. 2020., Development of lightweight and high-performance ballistic helmet based on poly (Benzoxazine-co-urethane) matrix reinforced with aramid fabric and multi-walled carbon nanotubes. **Polymers, 12**(12), 2897.

30. Rajput, M. S., Bhuarya, M. K., & Gupta, A. 2017., Finite element simulation of impact on PASGT army helmet. **Procedia engineering, 173,** 251-258.

31. Rodríguez-Millán, M., Olmedo, A., & Romualdo, G. (2016, September). Behavior of a new combat helmet design against ballistic impact: Experimental and numerical analysis. In *13th Personal Armour Systems Symposium–PASS, Amsterdam, Netherlands (NL)* (pp. 19-23).

32. Callahan J. ‘‘Analysis of Composite Helmet Impact by the Finite Element Method’’ Thesis Submitted to the Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science in Aerospace Engineering,, 2011 Blacksburg, VA

33. Alexopoulos, G., Quadri, N., Khan, M., Bazai, H., Pico, C. F., Fraser, C., ... & Mercier, P. 2020., Ballistic lobar trajectory outcomes in civilian firearm penetrating brain injury. **Journal of neurosurgery, 135**(2), 574-583.

34. Fejdyś, M., Łandwijt, M., Habaj, W., & Struszczyk, M. H. 2015., Ballistic helmet development using UHMWPE fibrous materials. **Fibres & Textiles in Eastern Europe, 23**(1 (109)).

35. Li, Y., Fan, H., & Gao, X. L. 2022. Ballistic helmets: Recent advances in materials, protection mechanisms, performance, and head injury mitigation. **Composites Part B: Engineering, 238,** 109890.

36. NIJ-010601 (Web sayfası: https://www.ojp.gov/pdffiles1/nij/077182.pdf) Erişim tarihi: Temmuz 2023

37. U.S. Department of Justice Office. 2001., NIJ Standard-0101.04, ballistic resistance of personal body armor. Washington DC: US Department of Justice.

38. ANSYS/LS DYNA (Web sayfası: https://lsdyna.ansys.com/dynamat/), Erişim tarihi: Şubat 2024

39. Wen, Y. K., Xu, C., Chen, A. J., & Wang, S. 2013., Experimental and numerical study of ballistic impact performance on UHMWPE composites. **Advanced Materials Research, 818,** 30-36.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı: İsmail Furkan SARUHAN
Uyruğu: Türkiye (T.C)
Doğum Tarihi ve Yeri:
Medeni Durum:
e-mail:
Telefon Numarası:

EĞİTİM

Derece	Kurum	Mezuniyet Tarihi
Yüksek Lisans	Erciyes Üniversitesi, Makine Mühendisliği	2024
Lisans	Erciyes Üniversitesi, Makine Mühendisliği	2021

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görev
2022-Halen	CES İLERİ KOMPOZİT VE SAVUNMA TEK. A.Ş.	Tasarım ve Analiz Mühendisi
2021-2022	KİM Kayseri İleri Malzemeler A.Ş.	ÜR/GE Mühendisi

YABANCI DİL

İngilizce

YAYINLAR

1.Saruhan, İ.F., Güneş R., Numerical Simulation of Ballistic Impact on Kevlar Laminates Armour, *International Conference on Advances and Innovations in Engineering*, Eylül 2023, Erzurum