

**T.C.
MANİSA CELAL BAYAR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
MAKİNE TEORİSİ VE DİNAMİĞİ BİLİM DALI**

BOŞLUKLU BİR ZIRHIN BALİSTİK PERFORMANSININ İNCELENMESİ

Ayşegül SENCÜ

**Danışman
Dr. Öğr. Üyesi Saim KURAL**



MANİSA-2023

TAAHHÜTNAME

Bu tezin Manisa Celal Bayar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde, akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını ve kullanılan tüm literatür bilgilerinin referans gösterilerek tezde yer aldığını beyan ederim.

Ayşegül SENCÜ



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
İÇİNDEKİLER	I
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	III
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	IV
TABLO DİZİNİ	VII
TEŞEKKÜR.....	VII
ÖZET.....	IX
ABSTRACT	X
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ÇALIŞMALARI	3
3. BALİSTİK	19
3.1. Balistik Nedir?.....	19
3.1.1. Balistiğin Bölümleri.....	19
3.1.1.1. İç Balistik	19
3.1.1.2. Dış Balistik	21
3.1.1.3. Terminal Balistik.....	22
3.2. Hasar Mekanizmaları	22
3.3. Balistik Standartlar	24
4. ZIRHLAR	26
4.1. Zırh Çeşitleri.....	28
4.1.1. Pasif Zırhlar	28
4.1.1.1. Sıvı Zırhlar	28
4.1.1.2. Metal Zırhlar	29
4.1.1.3. Seramik Zırhlar	30
4.1.1.3.1. Alümina (Al_2O_3).....	30
4.1.1.3.2. Bor Karbür (B_4C)	31
4.1.1.3.3. Silisyum Karbür (SiC).....	32
4.1.2. Polimer Zırhlar.....	33
4.1.3. Reaktif Zırhlar	34
4.1.4. Aktif Zırhlar.....	34
4.2. Zırh Sistemlerinde Kullanılan Analitik Modeller	35
4.2.1. Florence Modeli.....	35
4.2.2. Değiştirilmiş Florence Modeli	35
4.2.3. Ben-Dor, Dubinsky ve Elperin Modeli.....	35
4.2.4. Pol Modeli	35
4.2.5. Borvik Modeli.....	36
4.2.6. Woodward-Cimpoeru Modeli.....	36
4.2.7. Thompson Modeli.....	36
4.2.8. Wijk Modeli.....	36
4.2.9. Lambert-Jones Modeli	36
5. MERMİ	37
6. MATERYALLER VE YÖNTEMLER	38
6.1. Materyaller	38
6.2. Yöntemler	38
7. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	39
7.1. Analiz Sonuçları	41
Analiz 1	41
Analiz 2.....	44

Analiz 3.....	47
Analiz 4.....	50
Analiz 5.....	53
Analiz 6.....	56
Analiz 7.....	59
Analiz 8.....	62
Analiz 9.....	65
Analiz 10.....	68
Analiz 11.....	71
Analiz 12.....	74
Analiz 13.....	77
Analiz 14.....	80
Analiz 15.....	83
Analiz 16.....	86
Analiz 17.....	89
Analiz 18.....	92
Analiz 19.....	95
Analiz 20.....	98
Analiz 21.....	101
Analiz 22.....	104
Analiz 23.....	107
Analiz 24.....	110
Analiz 25.....	113
Analiz 26.....	116
8. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	120
Değerlendirme 1.....	120
Değerlendirme 2.....	120
Değerlendirme 3.....	121
Değerlendirme 4.....	121
Değerlendirme 5.....	122
Değerlendirme 6.....	122
Değerlendirme 7.....	123
Değerlendirme 8.....	124
8.1.Yorumlar.....	124
KAYNAKLAR.....	125
ÖZGEÇMİŞ.....	131

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

CAD	Bilgisayar Destekli Tasarım
CEN	European Committee for Standardization (Avrupa Balistik Standartları)
GOST	Gosudarstvennyy Standart (Rusya Eyalet Standartları)
HHA	Yüksek Sertlike Çelik
HOSDB	Home Office Body Armour Standard (Birleşik Krallık Gövde Zırhı Standartları)
NATO	North Atlantic Treaty Organization (Kuzey Atlantik Antlaşması Örgütü)
NIJ	The National Institute of Justice (Ulusal Adalet Kurumu)
STANAG	Standardization Agreement (NATO Standardizasyon Anlaşması)
RHA	Haddelenmiş Homojen Zırh Çeliği
VHS	Değişken Sertlikte Çelik

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 1.1. MARK I	1
Şekil 3.1. Hasar Mekanizmaları Örnekleri.....	23
Şekil 4.1. Altıgen Alümina Seramik	30
Şekil 4.2. Farklı Geometride Bor Karbür Seramik.....	32
Şekil 4.3. Altıgen Silisyum Karbür Seramik.....	33
Şekil 7.1. Ogive Uçlu Mermi	39
Şekil 7.2. AA5083-H116 Zırh Malzemesi	40
Şekil 7.3. Analiz 1 Katı Modeli	42
Şekil 7.4. Analiz 1 Eşdeğer Gerilme Dağılımları	42
Şekil 7.5. Analiz 1 Eşdeğer Gerilme Grafiği	43
Şekil 7.6. Analiz 1 Hız Probu Grafiği.....	43
Şekil 7.7. Analiz 1 Hız Probu Dağılımları	44
Şekil 7.8. Analiz 2 Katı Modeli	45
Şekil 7.9. Analiz 2 Eşdeğer Gerilme Dağılımları	45
Şekil 7.10. Analiz 2 Eşdeğer Gerilme Grafiği	46
Şekil 7.11. Analiz 2 Hız Probu Grafiği.....	46
Şekil 7.12. Analiz 2 Hız Probu Dağılımları	47
Şekil 7.13. Analiz 3 Katı Modeli	48
Şekil 7.14. Analiz 3 Eşdeğer Gerilme Dağılımları	48
Şekil 7.15. Analiz 3 Eşdeğer Gerilme Grafiği	49
Şekil 7.16. Analiz 3 Hız Probu Grafiği.....	49
Şekil 7.17. Analiz 3 Hız Probu Dağılımları	50
Şekil 7.18. Analiz 4 Katı Modeli	51
Şekil 7.19. Analiz 4 Eşdeğer Gerilme Dağılımları	51
Şekil 7.20. Analiz 4 Eşdeğer Gerilme Grafiği	52
Şekil 7.21. Analiz 4 Hız Probu Grafiği.....	52
Şekil 7.22. Analiz 4 Hız Probu Dağılımları	53
Şekil 7.23. Analiz 5 Katı Modeli	54
Şekil 7.24. Analiz 5 Eşdeğer Gerilme Dağılımları	54
Şekil 7.25. Analiz 5 Eşdeğer Gerilme Grafiği	55
Şekil 7.26. Analiz 5 Hız Probu Grafiği.....	55
Şekil 7.27. Analiz 5 Hız Probu Dağılımları	56
Şekil 7.28. Analiz 6 Katı Modeli	57
Şekil 7.29. Analiz 6 Eşdeğer Gerilme Dağılımları	57
Şekil 7.30. Analiz 6 Eşdeğer Gerilme Grafiği	58
Şekil 7.31. Analiz 6 Hız Probu Grafiği.....	58
Şekil 7.32. Analiz 6 Hız Probu Dağılımları	59
Şekil 7.33. Analiz 7 Katı Modeli	60
Şekil 7.34. Analiz 7 Eşdeğer Gerilme Dağılımları	60
Şekil 7.35. Analiz 7 Eşdeğer Gerilme Grafiği	61
Şekil 7.36. Analiz 7 Hız Probu Grafiği.....	61
Şekil 7.37. Analiz 7 Hız Probu Dağılımları	62
Şekil 7.38. Analiz 8 Katı Modeli	63
Şekil 7.39. Analiz 8 Eşdeğer Gerilme Dağılımları	63
Şekil 7.40. Analiz 8 Eşdeğer Gerilme Grafiği	64
Şekil 7.41. Analiz 8 Hız Probu Grafiği.....	64
Şekil 7.42. Analiz 8 Hız Probu Dağılımları	65

Şekil 7.43. Analiz 9 Katı Modeli	66
Şekil 7.44. Analiz 9 Eşdeğer Gerilme Dağılımları	66
Şekil 7.45. Analiz 9 Eşdeğer Gerilme Grafiği	67
Şekil 7.46. Analiz 9 Hız Probu Grafiği	67
Şekil 7.47. Analiz 9 Hız Probu Dağılımları	68
Şekil 7.48. Analiz 10 Katı Modeli	69
Şekil 7.48. Analiz 10 Eşdeğer Gerilme Dağılımları	69
Şekil 7.49. Analiz 10 Eşdeğer Gerilme Grafiği	70
Şekil 7.50. Analiz 10 Hız Probu Grafiği	70
Şekil 7.51. Analiz 10 Hız Probu Dağılımları	71
Şekil 7.52. Analiz 11 Katı Modeli	72
Şekil 7.53. Analiz 11 Eşdeğer Gerilme Dağılımları	72
Şekil 7.54. Analiz 11 Eşdeğer Gerilme Grafiği	73
Şekil 7.55. Analiz 11 Hız Probu Grafiği	73
Şekil 7.56. Analiz 11 Hız Probu Dağılımları	74
Şekil 7.57. Analiz 12 Katı Modeli	75
Şekil 7.58. Analiz 12 Eşdeğer Gerilme Dağılımları	75
Şekil 7.59. Analiz 12 Eşdeğer Gerilme Grafiği	76
Şekil 7.60. Analiz 12 Hız Probu Grafiği	76
Şekil 7.61. Analiz 12 Hız Probu Dağılımları	77
Şekil 7.62. Analiz 13 Katı Modeli	78
Şekil 7.63. Analiz 13 Eşdeğer Gerilme Dağılımları	78
Şekil 7.64. Analiz 13 Eşdeğer Gerilme Grafiği	79
Şekil 7.65. Analiz 13 Hız Probu Grafiği	79
Şekil 7.66. Analiz 13 Hız Probu Dağılımları	80
Şekil 7.67. Analiz 14 Katı Modeli	81
Şekil 7.68. Analiz 14 Eşdeğer Gerilme Dağılımları	81
Şekil 7.69. Analiz 14 Eşdeğer Gerilme Grafiği	82
Şekil 7.70. Analiz 14 Hız Probu Grafiği	82
Şekil 7.71. Analiz 14 Hız Probu Dağılımları	83
Şekil 7.72. Analiz 15 Katı Modeli	84
Şekil 7.73. Analiz 15 Eşdeğer Gerilme Dağılımları	84
Şekil 7.74. Analiz 15 Eşdeğer Gerilme Grafiği	85
Şekil 7.75. Analiz 15 Hız Probu Grafiği	85
Şekil 7.76. Analiz 15 Hız Probu Dağılımları	86
Şekil 7.77. Analiz 16 Katı Modeli	87
Şekil 7.78. Analiz 16 Eşdeğer Gerilme Dağılımları	87
Şekil 7.79. Analiz 16 Eşdeğer Gerilme Grafiği	88
Şekil 7.80. Analiz 16 Hız Probu Grafiği	88
Şekil 7.81. Analiz 16 Hız Probu Dağılımları	89
Şekil 7.82. Analiz 17 Katı Modeli	90
Şekil 7.83. Analiz 17 Eşdeğer Gerilme Dağılımları	90
Şekil 7.84. Analiz 17 Eşdeğer Gerilme Grafiği	91
Şekil 7.85. Analiz 17 Hız Probu Grafiği	91
Şekil 7.86. Analiz 17 Hız Probu Dağılımları	92
Şekil 7.87. Analiz 18 Katı Modeli	93
Şekil 7.88. Analiz 18 Eşdeğer Gerilme Dağılımları	93
Şekil 7.89. Analiz 18 Eşdeğer Gerilme Grafiği	94
Şekil 7.90. Analiz 18 Hız Probu Grafiği	94
Şekil 7.91. Analiz 18 Hız Probu Dağılımları	95

Şekil 7.92. Analiz 19 Katı Modeli	96
Şekil 7.93. Analiz 19 Eşdeğer Gerilme Dağılımları	96
Şekil 7.94. Analiz 19 Eşdeğer Gerilme Grafiği	97
Şekil 7.95. Analiz 19 Hız Probu Grafiği	97
Şekil 7.96. Analiz 19 Hız Probu Dağılımları	98
Şekil 7.97. Analiz 20 Katı Modeli	99
Şekil 7.98. Analiz 20 Eşdeğer Gerilme Dağılımları	99
Şekil 7.99. Analiz 20 Eşdeğer Gerilme Grafiği	100
Şekil 7.100. Analiz 20 Hız Probu Grafiği	100
Şekil 7.101. Analiz 20 Hız Probu Dağılımları	101
Şekil 7.102. Analiz 21 Katı Modeli	102
Şekil 7.103. Analiz 21 Eşdeğer Gerilme Dağılımları	102
Şekil 7.104. Analiz 21 Eşdeğer Gerilme Grafiği	103
Şekil 7.105. Analiz 21 Hız Probu Grafiği	103
Şekil 7.106. Analiz 21 Hız Probu Dağılımları	104
Şekil 7.107. Analiz 22 Katı Modeli	105
Şekil 7.108. Analiz 22 Eşdeğer Gerilme Dağılımları	105
Şekil 7.109. Analiz 22 Eşdeğer Gerilme Grafiği	106
Şekil 7.110. Analiz 22 Hız Probu Grafiği	106
Şekil 7.111. Analiz 22 Hız Probu Dağılımları	107
Şekil 7.112. Analiz 23 Katı Modeli	108
Şekil 7.113. Analiz 23 Eşdeğer Gerilme Dağılımları	108
Şekil 7.114. Analiz 23 Eşdeğer Gerilme Grafiği	109
Şekil 7.115. Analiz 23 Hız Probu Grafiği	109
Şekil 7.116. Analiz 23 Hız Probu Dağılımları	110
Şekil 7.117. Analiz 24 Katı Modeli	111
Şekil 7.118. Analiz 24 Eşdeğer Gerilme Dağılımları	111
Şekil 7.119. Analiz 24 Eşdeğer Gerilme Grafiği	112
Şekil 7.120. Analiz 24 Hız Probu Grafiği	112
Şekil 7.121. Analiz 24 Hız Probu Dağılımları	113
Şekil 7.122. Analiz 25 Katı Modeli	114
Şekil 7.123. Analiz 25 Eşdeğer Gerilme Dağılımları	114
Şekil 7.124. Analiz 25 Eşdeğer Gerilme Grafiği	115
Şekil 7.125. Analiz 25 Hız Probu Grafiği	115
Şekil 7.126. Analiz 25 Hız Probu Dağılımları	116
Şekil 7.127. Analiz 26 Katı Modeli	117
Şekil 7.128. Analiz 26 Eşdeğer Gerilme Dağılımları	117
Şekil 7.129. Analiz 26 Eşdeğer Gerilme Grafiği	118
Şekil 7.130. Analiz 26 Hız Probu Grafiği	118
Şekil 7.131. Analiz 26 Hız Probu Dağılımları	119

TABLO DİZİNİ

	Sayfa
Tablo 3.1. Barut Kullanılarak Elde Edilen Enerjinin Kullanım Alanları.....	20
Tablo 3.2. Stanag 4569 Standardı	25
Tablo 4.1. %85-99.7 Saflıktaki Alüminanın Mekanik ve Fiziksel Özellikleri ...	31
Tablo 4.2. Mekanik Özellikler Bor Karbür için	32
Tablo 4.3. Silisyum Karbür Seramiğinin Özellikleri	33
Tablo 8.1. Değerlendirme 1 Karşılaştırma Tablosu	120
Tablo 8.2. Değerlendirme 2 Karşılaştırma Tablosu	121
Tablo 8.3. Değerlendirme 3 Karşılaştırma Tablosu	121
Tablo 8.4. Değerlendirme 4 Karşılaştırma Tablosu	121
Tablo 8.5. Değerlendirme 5 Karşılaştırma Tablosu	122
Tablo 8.6. Değerlendirme 6 Karşılaştırma Tablosu	122
Tablo 8.7. Değerlendirme 7 Karşılaştırma Tablosu	123
Tablo 8.8. Değerlendirme 8 Karşılaştırma Tablosu	124

TEŞEKKÜR

Benden sürekli yardımlarını ve desteğini esirgemeyen başta danışman hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Saim KURAL'a en büyük teşekkürlerimi sunarım. Yeri geldiğinde teknik, yeri geldiğinde manevi desteği ile bana sürekli güç veren arkadaşım Sayın Yüksek Metalurji ve Malzeme Mühendisi Filiz ÖZKAN'a teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca yoğun çalışmalarımda bana destek veren aileme teşekkür ederim.

Ayşegül SENCU
Manisa, 2023



ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

Ayşegül SENCU
Manisa Celal Bayar Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Saim KURAL

Bu tez çalışmasında, katmanlı zırhın yanı sıra çeşitli boşluklu ve konumda zırh yapıları da incelenmiştir.

Bu çalışmada ilk olarak mevcut yapılmış bir deneysel çalışma ele alınıp ve burada kullanılan mermi ve zırh modelleri ANSYS paket programının Design Modeler modülü ile tasarlanmıştır. Model oluşturulduktan sonra ANSYS Explicit Dynamics modülü ile analize başlamadan önce tasarım ağ yapılarına bölüp (mesh işlemi), yine referans çalışmadaki fiziksel koşullar modele sınır ve başlangıç şartı olarak uygulanmıştır (mermi hızı, dönmesi vs.). Gerekli analiz ayarları yapıldıktan sonra modelin çözümü yaptırılmıştır. Çıkan sonuçlar deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlar birbiri ile tutarlı hale gelip model için uygun mesh yapısı belirleninceye kadar mesh analizi yapılmaya devam edilmiştir. Mesh analizi yapıp, deneysel sonuçlar ile yapılan analiz sonuçları tutarlı hale gelince aynı mermiye karşılık kendi tasarladığımız boşluklu zırhın balistik testleri yapılmıştır.

Balistik olarak inceleyeceğimiz zırhlarda, kullanılacak malzeme seçimi, zırhın şekil ve konumlandırılması konusunda karar vermek için gereken her koşulu ayrı ayrı uygulamak çok maliyetli ve süregelen işlemlerdir. Bilgisayar ortamında gerekli programlarda tasarımlar, gerçeğe en uygun şartlar girilerek simülasyon yapmak bu zırhların performansları ile ilgili öngörüdür. Zırhların içeriğini, gelen mermiye karşı balistik davranışını görmek pratikte hayata geçirmek konusunda bu çalışma önem taşıyacaktır. Bu çalışmada uygulanan mermi hızının yanı sıra mermiye dönme hareketi de verilerek gerçeğe en yakın simülasyon yapılması hedeflenmiştir. Ayrıca bu çalışma sayesinde simülasyon programında yapılacak denemeler ile uygulamalı deneysel testlerden çok daha düşük bir maliyet ile tasarlanan zırhların balistik performansları belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: balistik, zırh, mermi, sonlu elemanlar, analiz, ansys, A15083-H116, S4340, ogive uçlu mermi

2023, 131 sayfa

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

Aysegul SENCU

**Manisa Celal Bayar University
Graduate School of Applied and Natural Sciences
Department of Mechanical Engineering**

Supervisor: Assistant Professor Saim KURAL

In this thesis study, various layered armor structures as well as perforated and positioned armor structures have been investigated.

Initially, an existing experimental study was taken into account, and the bullet and armor models used in that study were designed using the Design Modeler module of the ANSYS package program. After creating the model, it was divided into design mesh structures (meshing process) using the ANSYS Explicit Dynamics module. The physical conditions from the reference study were applied to the model as boundary and initial conditions (bullet velocity, rotation, etc.). Once the necessary analysis settings were made, the model was solved. The resulting outcomes were compared with the experimental results. Mesh analysis was continued until the results became consistent with each other and an appropriate mesh structure was determined for the model. After achieving consistency between the mesh analysis and the experimental results, ballistic tests were conducted on the perforated armor designed for the same bullet.

When examining the armor ballistically, it is costly and time-consuming to apply each condition separately for material selection, armor shape, and positioning. Designing simulations in computer programs by entering the most suitable conditions closest to reality provides insights into the performance of these armors. This study is important in practically implementing the armor content and its ballistic behavior against incoming bullets. Realistic simulations were aimed by incorporating not only bullet velocity but also rotational motion in this study. Additionally, through experiments conducted in the simulation program, the ballistic performance of armors designed at a significantly lower cost compared to practical experimental tests has been determined.

Keywords: ballistic, armor, bullet, finite element, analysis, ansys, A15083-H116, S4340, ogive head nose projectile

2023, 131 pages

1. GİRİŞ

Geçmişten günümüze kadar sürekli savunma veya saldırı amaçlarıyla savaşlar olmuştur. Muharebe sahasının vazgeçilmez unsurlarından biri zırh olmuştur [1]. Özellikle Birinci Dünya Savaşında yaşanan siper savaşları ile on binlerce asker canlarını kaybetmiştir. Savaşın sonlarına Birleşik Krallık Ordusu için üretilen Mark I tankı ilk zırhlı personel taşıyıcısı olmuştur. O günden sonra zırhlı araçlar savaşların en önemli gücü haline gelmiştir.



Şekil 1.1. MARK I [2]

Avrupa’da 1990’da yapılan Konvansiyonel Silahlı Kuvvetler Antlaşmasıyla birlikte NATO tarafından, Zırhlı Muharebe Aracı ve Zırhlı Personel Taşıyıcı tanımları netleştirilmiştir. Zırhlı muharebe Araç tanımlaması; erleri taşıyan ve herhangi bir çatışma olması durumunda erlere direkt destek vererek minimum 20mm’lik silah taşıyan araç, şeklinde yapılmıştır. Zırhlı Personel Taşıyıcı’nın tanımı; erleri taşımaktır, fakat direkt erleri desteklemekte sorumlu olmayan ve minimum 20mm’lik silah taşıyan araç, şeklinde yapılmıştır [3]. Bahsedilen iki araç da hareket kabiliyetini azaltmamak için hafif zırhla korunmaktadır [4].

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

CAD	Bilgisayar Destekli Tasarım
CEN	European Committee for Standardization (Avrupa Balistik Standartları)
GOST	Gosudarstvennyy Standart (Rusya Eyalet Standartları)
HHA	Yüksek Sertlike Çelik
HOSDB	Home Office Body Armour Standard (Birleşik Krallık Gövde Zırhı Standartları)
NATO	North Atlantic Treaty Organization (Kuzey Atlantik Antlaşması Örgütü)
NIJ	The National Institute of Justice (Ulusal Adalet Kurumu)
STANAG	Standardization Agreement (NATO Standardizasyon Anlaşması)
RHA	Haddelenmiş Homojen Zırh Çeliği
VHS	Değişken Sertlikte Çelik

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 1.1. MARK I	1
Şekil 3.1. Hasar Mekanizmaları Örnekleri.....	23
Şekil 4.1. Altıgen Alümina Seramik	30
Şekil 4.2. Farklı Geometride Bor Karbür Seramik.....	32
Şekil 4.3. Altıgen Silisyum Karbür Seramik.....	33
Şekil 7.1. Ogive Uçlu Mermi	39
Şekil 7.2. AA5083-H116 Zırh Malzemesi	40
Şekil 7.3. Analiz 1 Katı Modeli	42
Şekil 7.4. Analiz 1 Eşdeğer Gerilme Dağılımları	42
Şekil 7.5. Analiz 1 Eşdeğer Gerilme Grafiği	43
Şekil 7.6. Analiz 1 Hız Probu Grafiği.....	43
Şekil 7.7. Analiz 1 Hız Probu Dağılımları	44
Şekil 7.8. Analiz 2 Katı Modeli	45
Şekil 7.9. Analiz 2 Eşdeğer Gerilme Dağılımları	45
Şekil 7.10. Analiz 2 Eşdeğer Gerilme Grafiği	46
Şekil 7.11. Analiz 2 Hız Probu Grafiği.....	46
Şekil 7.12. Analiz 2 Hız Probu Dağılımları	47
Şekil 7.13. Analiz 3 Katı Modeli	48
Şekil 7.14. Analiz 3 Eşdeğer Gerilme Dağılımları	48
Şekil 7.15. Analiz 3 Eşdeğer Gerilme Grafiği	49
Şekil 7.16. Analiz 3 Hız Probu Grafiği.....	49
Şekil 7.17. Analiz 3 Hız Probu Dağılımları	50
Şekil 7.18. Analiz 4 Katı Modeli	51
Şekil 7.19. Analiz 4 Eşdeğer Gerilme Dağılımları	51
Şekil 7.20. Analiz 4 Eşdeğer Gerilme Grafiği	52
Şekil 7.21. Analiz 4 Hız Probu Grafiği.....	52
Şekil 7.22. Analiz 4 Hız Probu Dağılımları	53
Şekil 7.23. Analiz 5 Katı Modeli	54
Şekil 7.24. Analiz 5 Eşdeğer Gerilme Dağılımları	54
Şekil 7.25. Analiz 5 Eşdeğer Gerilme Grafiği	55
Şekil 7.26. Analiz 5 Hız Probu Grafiği.....	55
Şekil 7.27. Analiz 5 Hız Probu Dağılımları	56
Şekil 7.28. Analiz 6 Katı Modeli	57
Şekil 7.29. Analiz 6 Eşdeğer Gerilme Dağılımları	57
Şekil 7.30. Analiz 6 Eşdeğer Gerilme Grafiği	58
Şekil 7.31. Analiz 6 Hız Probu Grafiği.....	58
Şekil 7.32. Analiz 6 Hız Probu Dağılımları	59
Şekil 7.33. Analiz 7 Katı Modeli	60
Şekil 7.34. Analiz 7 Eşdeğer Gerilme Dağılımları	60
Şekil 7.35. Analiz 7 Eşdeğer Gerilme Grafiği	61
Şekil 7.36. Analiz 7 Hız Probu Grafiği.....	61
Şekil 7.37. Analiz 7 Hız Probu Dağılımları	62
Şekil 7.38. Analiz 8 Katı Modeli	63
Şekil 7.39. Analiz 8 Eşdeğer Gerilme Dağılımları	63
Şekil 7.40. Analiz 8 Eşdeğer Gerilme Grafiği	64
Şekil 7.41. Analiz 8 Hız Probu Grafiği.....	64
Şekil 7.42. Analiz 8 Hız Probu Dağılımları	65

Şekil 7.43. Analiz 9 Katı Modeli	66
Şekil 7.44. Analiz 9 Eşdeğer Gerilme Dağılımları	66
Şekil 7.45. Analiz 9 Eşdeğer Gerilme Grafiği	67
Şekil 7.46. Analiz 9 Hız Probu Grafiği	67
Şekil 7.47. Analiz 9 Hız Probu Dağılımları	68
Şekil 7.48. Analiz 10 Katı Modeli	69
Şekil 7.48. Analiz 10 Eşdeğer Gerilme Dağılımları	69
Şekil 7.49. Analiz 10 Eşdeğer Gerilme Grafiği	70
Şekil 7.50. Analiz 10 Hız Probu Grafiği	70
Şekil 7.51. Analiz 10 Hız Probu Dağılımları	71
Şekil 7.52. Analiz 11 Katı Modeli	72
Şekil 7.53. Analiz 11 Eşdeğer Gerilme Dağılımları	72
Şekil 7.54. Analiz 11 Eşdeğer Gerilme Grafiği	73
Şekil 7.55. Analiz 11 Hız Probu Grafiği	73
Şekil 7.56. Analiz 11 Hız Probu Dağılımları	74
Şekil 7.57. Analiz 12 Katı Modeli	75
Şekil 7.58. Analiz 12 Eşdeğer Gerilme Dağılımları	75
Şekil 7.59. Analiz 12 Eşdeğer Gerilme Grafiği	76
Şekil 7.60. Analiz 12 Hız Probu Grafiği	76
Şekil 7.61. Analiz 12 Hız Probu Dağılımları	77
Şekil 7.62. Analiz 13 Katı Modeli	78
Şekil 7.63. Analiz 13 Eşdeğer Gerilme Dağılımları	78
Şekil 7.64. Analiz 13 Eşdeğer Gerilme Grafiği	79
Şekil 7.65. Analiz 13 Hız Probu Grafiği	79
Şekil 7.66. Analiz 13 Hız Probu Dağılımları	80
Şekil 7.67. Analiz 14 Katı Modeli	81
Şekil 7.68. Analiz 14 Eşdeğer Gerilme Dağılımları	81
Şekil 7.69. Analiz 14 Eşdeğer Gerilme Grafiği	82
Şekil 7.70. Analiz 14 Hız Probu Grafiği	82
Şekil 7.71. Analiz 14 Hız Probu Dağılımları	83
Şekil 7.72. Analiz 15 Katı Modeli	84
Şekil 7.73. Analiz 15 Eşdeğer Gerilme Dağılımları	84
Şekil 7.74. Analiz 15 Eşdeğer Gerilme Grafiği	85
Şekil 7.75. Analiz 15 Hız Probu Grafiği	85
Şekil 7.76. Analiz 15 Hız Probu Dağılımları	86
Şekil 7.77. Analiz 16 Katı Modeli	87
Şekil 7.78. Analiz 16 Eşdeğer Gerilme Dağılımları	87
Şekil 7.79. Analiz 16 Eşdeğer Gerilme Grafiği	88
Şekil 7.80. Analiz 16 Hız Probu Grafiği	88
Şekil 7.81. Analiz 16 Hız Probu Dağılımları	89
Şekil 7.82. Analiz 17 Katı Modeli	90
Şekil 7.83. Analiz 17 Eşdeğer Gerilme Dağılımları	90
Şekil 7.84. Analiz 17 Eşdeğer Gerilme Grafiği	91
Şekil 7.85. Analiz 17 Hız Probu Grafiği	91
Şekil 7.86. Analiz 17 Hız Probu Dağılımları	92
Şekil 7.87. Analiz 18 Katı Modeli	93
Şekil 7.88. Analiz 18 Eşdeğer Gerilme Dağılımları	93
Şekil 7.89. Analiz 18 Eşdeğer Gerilme Grafiği	94
Şekil 7.90. Analiz 18 Hız Probu Grafiği	94
Şekil 7.91. Analiz 18 Hız Probu Dağılımları	95

Şekil 7.92. Analiz 19 Katı Modeli	96
Şekil 7.93. Analiz 19 Eşdeğer Gerilme Dağılımları	96
Şekil 7.94. Analiz 19 Eşdeğer Gerilme Grafiği	97
Şekil 7.95. Analiz 19 Hız Probu Grafiği	97
Şekil 7.96. Analiz 19 Hız Probu Dağılımları	98
Şekil 7.97. Analiz 20 Katı Modeli	99
Şekil 7.98. Analiz 20 Eşdeğer Gerilme Dağılımları	99
Şekil 7.99. Analiz 20 Eşdeğer Gerilme Grafiği	100
Şekil 7.100. Analiz 20 Hız Probu Grafiği	100
Şekil 7.101. Analiz 20 Hız Probu Dağılımları	101
Şekil 7.102. Analiz 21 Katı Modeli	102
Şekil 7.103. Analiz 21 Eşdeğer Gerilme Dağılımları	102
Şekil 7.104. Analiz 21 Eşdeğer Gerilme Grafiği	103
Şekil 7.105. Analiz 21 Hız Probu Grafiği	103
Şekil 7.106. Analiz 21 Hız Probu Dağılımları	104
Şekil 7.107. Analiz 22 Katı Modeli	105
Şekil 7.108. Analiz 22 Eşdeğer Gerilme Dağılımları	105
Şekil 7.109. Analiz 22 Eşdeğer Gerilme Grafiği	106
Şekil 7.110. Analiz 22 Hız Probu Grafiği	106
Şekil 7.111. Analiz 22 Hız Probu Dağılımları	107
Şekil 7.112. Analiz 23 Katı Modeli	108
Şekil 7.113. Analiz 23 Eşdeğer Gerilme Dağılımları	108
Şekil 7.114. Analiz 23 Eşdeğer Gerilme Grafiği	109
Şekil 7.115. Analiz 23 Hız Probu Grafiği	109
Şekil 7.116. Analiz 23 Hız Probu Dağılımları	110
Şekil 7.117. Analiz 24 Katı Modeli	111
Şekil 7.118. Analiz 24 Eşdeğer Gerilme Dağılımları	111
Şekil 7.119. Analiz 24 Eşdeğer Gerilme Grafiği	112
Şekil 7.120. Analiz 24 Hız Probu Grafiği	112
Şekil 7.121. Analiz 24 Hız Probu Dağılımları	113
Şekil 7.122. Analiz 25 Katı Modeli	114
Şekil 7.123. Analiz 25 Eşdeğer Gerilme Dağılımları	114
Şekil 7.124. Analiz 25 Eşdeğer Gerilme Grafiği	115
Şekil 7.125. Analiz 25 Hız Probu Grafiği	115
Şekil 7.126. Analiz 25 Hız Probu Dağılımları	116
Şekil 7.127. Analiz 26 Katı Modeli	117
Şekil 7.128. Analiz 26 Eşdeğer Gerilme Dağılımları	117
Şekil 7.129. Analiz 26 Eşdeğer Gerilme Grafiği	118
Şekil 7.130. Analiz 26 Hız Probu Grafiği	118
Şekil 7.131. Analiz 26 Hız Probu Dağılımları	119

TABLO DİZİNİ

	Sayfa
Tablo 3.1. Barut Kullanılarak Elde Edilen Enerjinin Kullanım Alanları.....	20
Tablo 3.2. Stanag 4569 Standardı	25
Tablo 4.1. %85-99.7 Saflıktaki Alüminanın Mekanik ve Fiziksel Özellikleri ...	31
Tablo 4.2. Mekanik Özellikler Bor Karbür için	32
Tablo 4.3. Silisyum Karbür Seramiğinin Özellikleri	33
Tablo 8.1. Değerlendirme 1 Karşılaştırma Tablosu	120
Tablo 8.2. Değerlendirme 2 Karşılaştırma Tablosu	121
Tablo 8.3. Değerlendirme 3 Karşılaştırma Tablosu	121
Tablo 8.4. Değerlendirme 4 Karşılaştırma Tablosu	121
Tablo 8.5. Değerlendirme 5 Karşılaştırma Tablosu	122
Tablo 8.6. Değerlendirme 6 Karşılaştırma Tablosu	122
Tablo 8.7. Değerlendirme 7 Karşılaştırma Tablosu	123
Tablo 8.8. Değerlendirme 8 Karşılaştırma Tablosu	124

TEŞEKKÜR

Benden sürekli yardımlarını ve desteğini esirgemeyen başta danışman hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Saim KURAL'a en büyük teşekkürlerimi sunarım. Yeri geldiğinde teknik, yeri geldiğinde manevi desteği ile bana sürekli güç veren arkadaşım Sayın Yüksek Metalurji ve Malzeme Mühendisi Filiz ÖZKAN'a teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca yoğun çalışmalarımda bana destek veren aileme teşekkür ederim.

Ayşegül SENCU
Manisa, 2023



ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

Ayşegül SENCU
Manisa Celal Bayar Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Saim KURAL

Bu tez çalışmasında, katmanlı zırhın yanı sıra çeşitli boşluklu ve konumda zırh yapıları da incelenmiştir.

Bu çalışmada ilk olarak mevcut yapılmış bir deneysel çalışma ele alınıp ve burada kullanılan mermi ve zırh modelleri ANSYS paket programının Design Modeler modülü ile tasarlanmıştır. Model oluşturulduktan sonra ANSYS Explicit Dynamics modülü ile analize başlamadan önce tasarım ağ yapılarına bölüp (mesh işlemi), yine referans çalışmadaki fiziksel koşullar modele sınır ve başlangıç şartı olarak uygulanmıştır (mermi hızı, dönmesi vs.). Gerekli analiz ayarları yapıldıktan sonra modelin çözümü yaptırılmıştır. Çıkan sonuçlar deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlar birbiri ile tutarlı hale gelip model için uygun mesh yapısı belirleninceye kadar mesh analizi yapılmaya devam edilmiştir. Mesh analizi yapıp, deneysel sonuçlar ile yapılan analiz sonuçları tutarlı hale gelince aynı mermiye karşılık kendi tasarladığımız boşluklu zırhın balistik testleri yapılmıştır.

Balistik olarak inceleyeceğimiz zırhlarda, kullanılacak malzeme seçimi, zırhın şekil ve konumlandırılması konusunda karar vermek için gereken her koşulu ayrı ayrı uygulamak çok maliyetli ve süregelen işlemlerdir. Bilgisayar ortamında gerekli programlarda tasarımlar, gerçeğe en uygun şartlar girilerek simülasyon yapmak bu zırhların performansları ile ilgili öngörüdür. Zırhların içeriğini, gelen mermiye karşı balistik davranışını görmek pratikte hayata geçirmek konusunda bu çalışma önem taşıyacaktır. Bu çalışmada uygulanan mermi hızının yanı sıra mermiye dönme hareketi de verilerek gerçeğe en yakın simülasyon yapılması hedeflenmiştir. Ayrıca bu çalışma sayesinde simülasyon programında yapılacak denemeler ile uygulamalı deneysel testlerden çok daha düşük bir maliyet ile tasarlanan zırhların balistik performansları belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: balistik, zırh, mermi, sonlu elemanlar, analiz, ansys, A15083-H116, S4340, ogive uçlu mermi

2023, 131 sayfa

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

Aysegul SENCU

**Manisa Celal Bayar University
Graduate School of Applied and Natural Sciences
Department of Mechanical Engineering**

Supervisor: Assistant Professor Saim KURAL

In this thesis study, various layered armor structures as well as perforated and positioned armor structures have been investigated.

Initially, an existing experimental study was taken into account, and the bullet and armor models used in that study were designed using the Design Modeler module of the ANSYS package program. After creating the model, it was divided into design mesh structures (meshing process) using the ANSYS Explicit Dynamics module. The physical conditions from the reference study were applied to the model as boundary and initial conditions (bullet velocity, rotation, etc.). Once the necessary analysis settings were made, the model was solved. The resulting outcomes were compared with the experimental results. Mesh analysis was continued until the results became consistent with each other and an appropriate mesh structure was determined for the model. After achieving consistency between the mesh analysis and the experimental results, ballistic tests were conducted on the perforated armor designed for the same bullet.

When examining the armor ballistically, it is costly and time-consuming to apply each condition separately for material selection, armor shape, and positioning. Designing simulations in computer programs by entering the most suitable conditions closest to reality provides insights into the performance of these armors. This study is important in practically implementing the armor content and its ballistic behavior against incoming bullets. Realistic simulations were aimed by incorporating not only bullet velocity but also rotational motion in this study. Additionally, through experiments conducted in the simulation program, the ballistic performance of armors designed at a significantly lower cost compared to practical experimental tests has been determined.

Keywords: ballistic, armor, bullet, finite element, analysis, ansys, A15083-H116, S4340, ogive head nose projectile

2023, 131 pages

1. GİRİŞ

Geçmişten günümüze kadar sürekli savunma veya saldırı amaçlarıyla savaşlar olmuştur. Muharebe sahasının vazgeçilmez unsurlarından biri zırh olmuştur [1]. Özellikle Birinci Dünya Savaşında yaşanan siper savaşları ile on binlerce asker canlarını kaybetmiştir. Savaşın sonlarına Birleşik Krallık Ordusu için üretilen Mark I tankı ilk zırhlı personel taşıyıcısı olmuştur. O günden sonra zırhlı araçlar savaşların en önemli gücü haline gelmiştir.



Şekil 1.1. MARK I [2]

Avrupa’da 1990’da yapılan Konvansiyonel Silahlı Kuvvetler Antlaşmasıyla birlikte NATO tarafından, Zırhlı Muharebe Aracı ve Zırhlı Personel Taşıyıcı tanımları netleştirilmiştir. Zırhlı muharebe Araç tanımlaması; erleri taşıyan ve herhangi bir çatışma olması durumunda erlere direkt destek vererek minimum 20mm’lik silah taşıyan araç, şeklinde yapılmıştır. Zırhlı Personel Taşıyıcı’nın tanımı; erleri taşımaktır, fakat direkt erleri desteklemekte sorumlu olmayan ve minimum 20mm’lik silah taşıyan araç, şeklinde yapılmıştır [3]. Bahsedilen iki araç da hareket kabiliyetini azaltmamak için hafif zırhla korunmaktadır [4].

Zırhlı savaş araçlarının yüksek hareket kabiliyetine sahip olması için, hafif ve mukavim zırh malzemeleri geliştirilmiştir ve bu malzemeler arasında metaller, seramikler ve kompozitler sıkça kullanılmaktadır. Zırh malzemelerinin balistik direnci, mermi boyutu, şekli, yoğunluğu ve sertliği gibi mermi özellikleri, darbe hızı ve açısı gibi çarpma durumu özellikleri ve sertlik/dayanım oranı, süneklik, mikroyapı ve kalınlık gibi hedef plaka özelliklerine bağlıdır [5] Metaller, zırh malzemeleri arasında en yaygın kullanılan malzeme türüdür ve çelik, alüminyum, titanyum ve magnezyum bu malzemeler arasında yer almaktadır. Çelikler, yüksek dayanım ve süneklik özellikleri sayesinde hala zırh tasarımlarında en baskın malzeme olarak kullanılmaktadır. Ayrıca, uygun fiyatlarda tedarik edilebilirliği, işlenebilirliği, birleştirme tekniklerine yatkınlığı ve yüksek yorulma dayanımı gibi avantajları nedeniyle, diğer alaşımlara göre daha cazip bir seçenek haline gelmiştir. Zırh tasarımlarında, farklı malzemelerin özelliklerini birleştirerek, en uygun zırh tasarımlarını oluşturmak için katmanlı yapılar kullanılmaktadır. Bu, balistik çalışmalarda uzun süredir ilgi gören bir konudur [6].

Bu tez çalışmasında katmanlı zırh yanı sıra boşluklu zırh yapıları da incelenecektir. Bu çalışma sonucunun bize kazandıracığı; zırhlarda kullanılacak malzeme seçimi konusunda karar vermek için gereken her koşulu ayrı ayrı uygulamak çok maliyetli ve süregelen işlemlerdir. Bilgisayar ortamında gerekli programlarda yapılan tasarımların, gerçeğe en uygun şartlar uygun şartlar girilerek simülasyon yapılması balistik performans hakkında öngörü sağlayacaktır. Zırhların içeriğini, gelen mermiye karşı balistik davranışını görmek pratikte hayata geçirmek konusunda bu çalışma önem taşıyacaktır. Bu çalışmada uygulayacağımız mermi hızının yanı sıra mermiye dönme hareketi de verilerek gerçeğe en yakın simülasyon yapılması hedeflenmektedir. Ayrıca bu çalışma sayesinde simülasyon programında yapılacak denemeler ile uygulamalı deneysel testlerden çok daha düşük bir maliyet ile tasarlanan zırhların balistik performansları belirlenecektir.

2. LİTERATÜR ÇALIŞMALARI

Acar ve Aydın tarafından yapılan çalışmada, sayısal yöntemlerle fonksiyonel derecelendirilen levhaların balistik performansına, kalınlık boyunca bileşenlerin hacimsel değişim sürecinin etkisi incelenmiştir. Bu bağlamda, kalınlıkları farklı yani 5-10-15-20 katman sayılarına sahip olan Al / SiC fonksiyonel olarak kademelendirilip, levhaların balistik çarpma kuvvetinin altındaki davranışlarını sonlu elemanlar analizi yapan LS-DYNA yardımı ile analizini yapıp, değerlendirmişlerdir. Örneğin 500 m/s ve 750 m/s gibi değişken hızlarda 0.3 kalibrelik parçacık simüle edilmiş olup bir mermi levhaya atışı yapılmıştır. Bu çalışmadaki analiz neticesine göre, kademelendirilen bölge boyunca katman sayılarının artması ile merminin nüfuziyet derinliğinde çok fazla dikkat çekici bir etki etmemiştir. Hatta katman sayılarının artmasıyla beraber merminin nüfuziyeti ve levhaların arka yüzeylerinde oluşan şişme miktarı ihmal edilebilecek derece azalma gözlemlenmiştir. Bu tezin sonucunda görülmüştür ki fonksiyonel olarak sıralanmış olan malzemelerin belirlenen belli pozisyonda değişen malzeme kompozisyonunun devamlı veya kademeli olarak değişmesini, balistik performans bakımından önemli olduğu görülmüştür. Bu yalnızca termal yüklemeler bakımından önemli de olsa, çok açık şekilde belirlemiştir. Bu çalışmanın sonucunda varılan sonuç; fonksiyonel olarak kademelendirilen levhaların çok katmanlı olarak üretilmesiyle levha dayanımının ek belirlenmiş bir katkı sağlamaması olarak yorumlamışlardır [8].

Yapıcı tarafından yapılan çalışmada, farklı hıza sahip ve çapı 24mm, ağırlığıysa 17kg, elastisite modülü 210GPa, Poison oranı 0.29' olarak vurucu mermi, kompozit levhaların üstüne düşürülüp, belirlenen bir hızda temas ettirilmiştir. Bu çalışmada hava direnci ihmal edilmiş olup, vurucunun kompozit plakaya olan çarpma hızları sırasıyla '2.0m/s-2.5m/s-3.0m/s-3.5m/s-4.0m/s' olarak başlangıç hızlarıyla temas halindeyken plaka üzerine doğru hareket ettirilmiştir. Plaka katmanlı olup, 16 tabakalıdır. Plakanın yön ve açıları değiştirilerek farklılık yaratılmıştır. Deneyden çıkan sonuçlar incelenmiş ve artan darbe hızı ile beraber aynı zamanda kompozit malzemenin üzerinde meydana gelen deformasyon miktarı da artmıştır. Ayrıca, mermi geri tepme hızı azaldığı görülmüştür. Yapılan sonlu elemanlar yöntemiyle uygulamada darbe hızında kuvvet eğrisi parabolik olarak sürekli artmış ve en yüksek değere ulaşmasının ardından tekrar parabolik olarak sürekli azaldığı görülmüştür. En çok olan

temas kuvvetin artmasına darbe hızının artması neden olmuştur. Darbe hızlarına göre yer değiştirme ve zaman arasındaki ilişki incelenmiş ve sonlu elemanlar yöntemiyle yapılan uygulamalarda, darbe hızının artmasıyla birlikte yer değiştirme eğrisinin parabolik bir şekilde artış gösterdiği, aynı zamanda en yüksek çökme miktarının da arttığı görülmüştür. Sonlu elemanlarla elde edilen sonuçlar ile deneysel sonuçlara bakılıp, karşılaştırıldığında sonuçların beklenen şekide olmayıp, darbe hızının 4m/s olarak artan deformasyondan dolayı, çökme miktarının azaldığı görülmüştür. Kompozit malzemelerde, darbe sırasında kalıcı deformasyon oluşması ve buna bağlı olarak, tabaka ayrılması, elyaf kopması, matris çatlamasından dolayı sonlu elemanlar yönteminin kullanılıp elde edilen sonuçlar ile deneysel sonuçların farklı çıkmasının nedeni şeklinde düşünülmüştür [7].

Onga'nın yaptığı çalışmada, zırhlı sistemin içinde bulunan tabaka dizilişlerinin önemi incelenmiştir. İlk plaka olarak çok sert katı bir plaka, ikinci plaka olarak yaşanabilecek şok dalgasının yavaşlatılabilmesi için 'ortotropik tabaka' yerleştirilmiştir. Bu çalışmada, şok dalgasının etkisini azaltmak ve enerjisini dağıtmak amacıyla üçüncü bir gözenekli tabaka ve destek oluşturmak için dördüncü bir tabaka tasarımı gerçekleştirilmiştir. Dört tabaka üzerine yapılan tasarım çalışması sonrasında, katman halinde oluşturulan kompozit zırh, benzeri şekilde yoğunluk sahibi olan çeliğe kıyasla çok daha fazla bir sönümleme davranışı sergilemiştir [9].

Özer'in yaptığı çalışmada, balistik çarpmanın sonucuyla oluşan etki sonlu elemanlar yöntemiyle incelemiştir. Yapılan bu tez çalışmasında yüksek hızlı darbeye maruz kalan malzemeler ile yapılarını içermektedir. Bu yapılarda Titanyum, 4340 Çelik ile Ti6Al4V Titanyum Alaşımıyla yapılan çeşitli kalınlığa sahip olan plakalara, farklı vurucu şekilleri ile beraber etkiye karşı dinamik tepkisini ölçmüşlerdir. Vurucu malzemesi olarak 4340 çelik malzemesinden yapılan, sivri uç, yarı sivri uç, yarı küresel uç olarak üç çeşit balistik materyaller kullanılmıştır. 200x200mm boyutlarındaki plakalar vurucu olan mermi tarafından çarpma etkisine maruz bırakılıp, Etkiye maruz kalan levhaların kalınlıkları 1mm, 2mm, 3mm, 4mm, 5mm, 6mm, 7mm olarak çeşitli kalınlıklar seçilmiştir. Yapılan tüm analizlerin sonucunda sabit olarak 350m/s hızda gerçekleşmiştir. Analiz ANYSYS/Workbench analiz programının bir alt modülü olan Auto-dyn, sonlu elemanlar yöntemi yardımı ile yapılmıştır. Levhalara temas ettirilen cismin atışının yapıldığı çeşitli uç şekillerindeki

vurucular 350m/s sabit hız ile levhaya çarptırılmıştır. Yapılan bu tez çalışmasında ve yarı küresel, sivri ve yarı sivri vurucu değişkenlerinin, kalınlığı 1mm ila 7mm aralarında olan 4340 çelik, Ti6Al4V titanyum ve titanyum alaşımlı levhalar üzerindeki etkileri incelenmiştir. Yapılan analizler ve çalışma neticelerine göre, sivri, yarı sivri ve yarı küresel vurucu yani tüm vurucu tiplerinde 1mm malzeme kalınlığındaki levhada delinme gözlemlenmiştir. 2mm malzeme kalınlığındaki levhada, sivri uç şekline sahip vurucu tipinde delinme gözlemlenmiştir. Sivri, yarı sivri ve yarı küresel vurucu yani tüm geometrik uca sahip olan vurucu tiplerinde en çok sehim değeri Ti6Al4V titanyum alaşım malzemesinde olmuş olup, en az sehim değerleriyse 4340 çelik malzemesi için olmuştur. Bir başka deyişle, sönmölen enerji değerin en fazla olduğu malzeme 4340 çelik malzemesi için olmuştur. Titanyum ve titanyum alaşımıysa malzeme kalınlığı arttığında benzer davranışlarda özellikler göstermiştir. Malzeme kalınlığının 6mm ve sonrası değerlendirildiğinde, bütün malzemelerin birbirlerine yakın olan davranışlar sergilediğı dikkat edilmiştir. Yapılan bütün sonuçlarda sönmölemiş olan enerji miktarı ve sehim değeri değerlendirildiğı zaman, kalınlık artması ile oluşan sehim değeri azalma olur iken, malzeme kendi sönmölediğı enerji miktarında artış görölmüştür. Bu çalışmada, malzemenin sönmölediğı enerjinin bir kısmının deformasyona, diğeri kısmının ise plaka yüzeyinde dalga oluşumuna sebep olduğı tespit edilmiştir. Ayrıca, vurucu tiplerinin çeşitliliğine bağı olarak malzemenin davranışında farklılıklar görölmüştür. Malzeme türleri arasındaki kalınlık farklılıkları ise mukavemet değeriinde değişiklikler yaratmıştır. Bu sebeple, zırh ve koruma malzemeleri tasarlarırken malzeme kalınlıklarının artmasıyla birlikte mukavemet değeriinde artış beklenmelidir. Ancak zırh malzemelerinin imalatında mukavemetin istenildiğı kadar hafiflikte istenmektedir. Kalınlık artışı ile birlikte kullanılan malzemenin hafifliğinde azalış olacaktır. Malzemenin kalınlığının artmasının dışında zırh malzemeleri için bir diğeri önemli konu olan maliyet de artacaktır. Bu sebeple, zırhın üretim aşamasında, farklı vurucu tiplerine göre farklı kullanım alanları belirlenerek tasarım ve imalat süreci gerçekleştirilmelidir. Ayrıca, zırh malzemesinin mukavemet değeriinin yüksek olması da önemli bir faktördür ve bu husus da tasarım aşamasında dikkate alınmalıdır. Bir diğeri yandan üretimi yapılırken kullanılacak olan malzemelerin maliyetinin de düşük ve hafif olması tercih edilme nedeni olmaktadır [10].

Jena tarafından yapılan çalışmada, farklı temperleme sıcaklıklarının çeliklerin mikroyapılarındaki ve mekanik özelliklerindeki değişimleri nasıl etkilediği ve bu değişimlerin balistik performans ile ilişkilendirilmesi amaçlanmıştır. Alüminyum ve yüksek dayanıma sahip olan zırh çeliği ısıtılma maruz bırakılarak çeşitli mekanik özelliklerin balistik davranışları incelenmiştir. Sonrasında yapılan deney ve gözlemlerde de aynı mermi tepkisine karşı aynı yapı malzemeleri farklı ısıtılma maruz bırakılarak farklı davranışlar elde edilmiştir. Alüminyum ve yüksek dayanıma sahip olan zırh çeliği ısıtılma tabi tutuldukları anda davranışları üzerindeki değişkenliklerin meydana geldiği tespit edilmiştir [11].

Baş'ın yaptığı çalışmada, tetik mekanizmasına gelen dinamik kuvvetler sonlu elemanlar metodu ile incelenmiştir. Sonlu elemanlar yöntemiyle program olarak ABAQUS programı kullanılmış olup silah içindeki mekanizma ve silahın modellenmesi ve tasarımı yapılmıştır. Bu model, başlangıç ve sınır koşulları uygulanarak analiz ile birlikte değerlendirilmiştir. Tasarım programı olan Catia aracılığıyla tampon modellenmiştir. Tasarım programı olan Catia kullanılıp oluşturulan bu model sonrasında 108 adet, çapı 3,6mm olan çelik bilyenin modeli içine tampon modeli yerleştirilmiştir. Sonrasında analizleri yapmak amacıyla modeller ABAQUS programına aktarılmışlardır. Analiz programında bilyelerin malzemeye atanmasının istendiği özellikleri tanımlanıp, daha sonra meshler yapılmıştır. Çelik tozu Malzemenin özeliği olarak kullanılmıştır. Çelik tozunun, elastisite modülü, yoğunluğu, poisson oranını ve yer çekimi ivmesi tanımlanmıştır. Çelik bilyelerin tamamı sabit olarak tanımlanıp, bilyelerin tamamı belli bir noktaya sabitlenmişlerdir. ABAQUS ortamında modelleme yapılırken, birbirlerinden farklı olan 2 nokta tanımlanarak, bu 2 nokta arasındaki uzunluğu 190mm olarak alınmıştır. Başlangıç noktasından 190mm uzaklıkta olan 2. noktaya yay sabit değeri 0,325N/mm girilerek yayla noktasal bağlantı sağlanılmıştır. Yapılan çalışmada, otomatik silahın ve içerisindeki mekanizmanın tasarımını Catia programı kullanıp yapmışlardır. Tasarım sırasında kullanılmış olan boyutlar M 16 (SR- 25 versiyonu) ve HK-417 piyade tüfeği ile benzer özellikler taşımaktadırlar. Sonrasında oluşturulan model kullanılıp, mekanizmanın gövdesinin çalışması esnasında dinamik analizini sonlu elemanlar programı olan ABAQUS kullanılıp, sınır ve başlangıç şartları uygulayarak yapmıştır. Yapılan bütün analizler sonuçlarına göre mekanizmanın başının hareket eden mekanizmanın gövdesine dahil edilmesiyle birlikte mekanizmanın gövdesinin hızında

azalış olduğu görülmüştür. İvmenin ani değişmesine hızdaki azalış sebep olmaktadır. Mekanizmanın gövdesinin hareketinden sonra geri getirme görevi görmekte olan yayın sıkışması ile birlikte 1350J değerinde bir potansiyel enerji depolanmaktadır. Mekanizmanın gövdesi hareket ediyorken tampon, sürtünme ve geri getirme fonksiyonu görmekte olan yay tarafından gelen absorbe edici kuvvetlerin neden olduğu yaklaşık olarak 5000J değerinde enerji kaybı oluşmuştur. Piston gücü kullanılarak hareket enerjisi sağlanan mekanizmanın, tamponun ve dipçiğe bağlı yayın geri sıkıştırılmasıyla depolanan potansiyel enerjinin mekanizmanın çalışması üzerindeki etkileri, boyutlarının, toleranslarının ve hareket etme şekillerinin birlikte incelenmesi gereken önemli konulardır. En fazla sıkışmanın olmasının ardından açığa çıkan enerjinin, mekanizmanın gövdesi namluya doğru belli bir hız ile hareket ettiğini görülmüştür [12].

Demir ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilen çalışmada, AISI 4140, AA5083 ve AA7075 malzemelerinin balistik performansları zırh delici mermi kullanılarak test edilmiştir. AISI 4140 ve AA7075 malzemelerinin ısıtılma sonrası mekanik özellikleri ve darbe dirençleri incelenmiştir. Yoğunluk eşitliği sağlanarak gerçekleştirilen analizler, AA7075-T651 malzemesinin en yüksek balistik dayanımı sergilediğini ve alüminyum alaşımlarının sertliğini artırmak için termal işlem uygulandığında balistik dayanımın da yükseldiğini ortaya koymuştur. Çelik malzemede ise, 53 RC sertlikte en iyi balistik performans elde edilmiştir ve sertlik artışının darbe direncini yükselttiği, ancak 60 RC sertlikte malzemenin kırılma yapısından dolayı darbeye karşı direncinin düştüğü gözlemlenmiştir [13].

Cheng ve arkadaşları tarafından yapılan araştırmada, İki tür ileri yüksek mukavemetli zırh çeliğinin balistik direncini, balistik sınırı ve hata modlarını değerlendirmeyi amaçlayan ogive uçlu mermi delme testi ve sayısal simülasyonlar gerçekleştirmişlerdir. İki yüksek mukavemetli zırh çeliği için mevcut yedi analitik modelin balistik sınırını ve kalıntı hızını tahmin etmedeki güvenilirliği değerlendirilmiştir [14].

Öztorun tarafından yapılan tez çalışmasında, ağır silah namlusunu sonlu elemanlar yöntemiyle incelemiş ve Elastik-plastik gerilme analizi yapmıştır. ABAQUS programı kullanılarak gerçekleştirilen sonlu elemanlar yöntemi ile, bir

namlunun içindeki mermi ateşlendikten sonra namlu üzerinde oluşan elastik ve plastik gerilmelerin analizi yapılmıştır. Bu sayede, güvenli bir ateşleme için gerekli koşullar tespit edilmiştir. Sonuçlar incelenerek tasarımda değişiklikler yapıp, yeniden analizlere tabi tutulmuştur. Bu şekilde optimum ölçü değerlerine ulaşılması amaçlanmıştır. Sonrasında ulaşılan sonuçların doğruluğunu tespit etmek amacı ile testlerde elde edilen ölçülerle karşılaştırılmıştır. Daha sonra namlunun kesit görüntüsünü alarak yapılmış olan analizler ile namlu çevresinde oluşan elastik ve plastik kısımların belirlenmesi amaçlanmıştır. Yapılan analizler ve değerlendirmeler neticesinde elde edilen gerilme değerlerinin farklı et kalınlığında namlulardan ulaşılan deney sonuçlarıyla kıyaslanmıştır. Analiz sonuçlarıyla deney sonuçları arasında, yaklaşık %4,36, teorik hesaplama ve deney neticesinde elde edilen değerler ile ise ortalama % 11,7'lik bir farklılığın olduğu tespit edilmiştir [15].

Zaera ve meslektaşları, alüminyum ve alümina levhalar kullanarak teorik bir model geliştirdiler ve sonuçları test etmek için ateşleme denemeleri yaptılar. Araştırmada iki farklı kalınlıkta alüminyum ve alümina kullanıldı. Woodward ve den Reijer'in penetrasyon formüllerini kullanarak Zaera ve meslektaşları yeni bir model geliştirdiler ve tehdit olarak 20mm APDS mermi seçtiler. Var olan modelin 7.62mm ve 12.7mm mermilere kıyasla daha iyi sonuçlar verdiğini iddia eden araştırmacılar, kendi geliştirdikleri analitik model ile 20mm'lik bir tehdit için Woodward ve den Reijer yöntemlerini karşılaştırdılar. Bu karşılaştırmada, den Reijer'in modeli 20mm'lik bir tehlide karşı başarılı bir sonuç vermedi. Ancak Woodward'ın modeli %10 hata payı ile iyi bir sonuç verdi. %2 hata payı ile en başarılı sonuç araştırmacılar tarafından geliştirilen model ile elde edildi. [16].

Wang ve arkadaşları, darbe olaylarının sayısal simülasyonları için kırılma kriterlerinin geliştirilmesinde Lode açısı etkisinin önemi le ilgili çalışmalar yapmışlardır. Lode açısı bağımlılığının kırılma kriterine dahil edilmesi, farklı burun şekillerine sahip silindirik mermilerle vurulan 2024-T351 alüminyum alaşımlı plakaların balistik direncini ve kırılma modellerini sonlu eleman simülasyonları aracılığıyla tahmin etme doğruluğunu önemli ölçüde artırdığını görmüşlerdir. Lode açısına bağlı modifiye Mohr-Coulomb kırılma kriteri, Lode'den bağımsız Johnson-Cook kırılma kriterine göre deneysel veriler ve hedef başarısızlık mekanizmalarıyla daha iyi uyum sağlamıştır [17].

Turhan ve ark. tarafından yapılan çalışmada, alüminyum 2024 ve alümina malzeme kullanılıp, analiz programı olarak LS-DYNA programı aracılığıyla simülasyonlar yapmışlar ve yapılan simülasyonlarda 7.62mm ve 12.7mm mermi kullanıp, yapılan deneylerle doğrulamayı hedeflemişlerdir. Simülasyonda kinematik ve plastik model kullanıp, alüminyum ve alüminanın kalınlığını 10mm şeklinde belirlemişlerdir. Seramik dağılmasını önleme amacı ile zırh levha ince bir alüminyum plakayla test düzeneğine tutturulmuştur. 235m olan bir uzaklıktan yapılan atışların sonucunda mermilerin çarpmasının hızı 838m/s ile 869m/s arasında değiştiği görülmüştür. Yapılan testlerin sonucuyla birlikte simülasyonların sonucu kıyaslanmıştır. Yapılan karşılaştırmalar ve testler sonucunda kullanılan simülasyon modelin gerçek sonuçlar ile yakın olduğu ve gelecek araştırmalarda kullanılabileceğini belirtmişlerdir [18].

Özşahin ve Tolun tarafından yapılan çalışmada, yüksek molekül ağırlıklı polietilen plakalar kullanılıp desteklenmiş AA7075 T 651 levhalarına balistik dayanımları 3 farklı katmana sıralamasını etkilerinin test edilmesini incelemişlerdir. Özşahin ve Tolun zırh sistemlerinde en çok kullanılan alüminyum levhalara, destek katmanı ekleyip, farklı alaşımlar ile balistik direncini arttırmak için yüzey kaplamaları kullanılmıştır. Öncelikle, alüminyum levhalar kaplamasız ve katmansız olarak test edilmiştir. Daha sonra, aynı kalınlıkta olacak şekilde, kobalt molibden krom tozu ve zirkonyum oksit tozu ile kaplanarak tekrar deney yapılmıştır. Daha sonra elyaf ‘‘UHMWPE’’ kompozit ile desteklenmiş levhalarla testlerini yapmışlardır. Takviye ile kaplama yapılmış plakalar, kaplamasız ve takviyesiz levhaya göre daha iyi sonuçlar vermişlerdir. Takviye ile kaplama yapılmış levhalar birbiri ile karşılaştırıldığında, balistik değerinin birbirlerine yakın olduğu gözlenmiştir [19].

Dateraksa ve ark. tarafından yapılan çalışmada, cam elyaf kompozit ile takviye edilmiş Al_2O_3 , B_4C ve SiC malzeme yüzeyine bir araştırma gerçekleştirmişlerdir. Araştırmacılar seramikler ardına S-2 cam takviyeli bir kompozit olan G RPC yerleştirerek seramiklerin limit hızlarını test etmişlerdir. Kullanılmış olan seramikler 100x100mm olup destek olarak kullanılan kompozit malzeme ise 120x120mm ve on üç katmandan oluşturulmuştur. Deneyin sonucunda sabit kalınlıkla kullanılmış olan seramikler balistik sınır hızları belirlemişlerdir. Yapılan deneylerden sonra çıkan

neticeyle kullanılan kompozit ile en çok dayanıklılığı alümina seramiği göstermiştir. [20].

Mei ve ark. tarafından yapılan çalışmada, metal ve seramik katmanlardan oluşan zırh levhanın kalınlıklarını değiştirip, penetrasyon derinliği ve enerji absorbe etme kapasitesini sonlu eleman analiz programı olan LS-DYNA programı kullanılarak simüle edilmiştir. Yapılan simülasyonlarla seramik olarak alümina modellenir iken, metal takviye katmanı olaraksa zırh çeliği kullanılmıştır. Gerçekleştirilen simülasyonlar sonucunda seramik katmanı kırılmadan hemen önce antipenetrasyon direnci yüksek iken, kırılma gerçekleşikten hemen sonra bu direncin azaldığı görülmüştür. Metal katmanına hasar gördükten sonraki antipenetrasyon direncinin çok az miktarda azaldığı gözlemlenmiştir. Seramik katman kalınlığının metal katman kalınlığına bölünmesi ile çalışmadaki kalınlık aralığı elde edilmiştir. Seramik / metal kalınlık oranları dikkate alındığında; 0.2-0.4-0.6 kalınlık oranları arasındaki en güzel balistik sonucu 0.2 oranının verdiği görülmüştür. 0.2 kalınlık oranında zırhın en az nüfuziyet derinliğine sahip olduğu ve en çok enerjiyi absorbe ettiği görülmüştür. [21].

Xhang ve arkadaşları tarafından yapılan çalışma, B₄C ve UHMW-PE için malzeme modellerinin doğruluğunu doğrulamayı ve zırh delici yarıcı bir merminin B₄C/UHMW-PE ve B₄C/C/UHMW-PE zırhları üzerindeki etkisini simüle etmeyi amaçlamıştır. Simülasyonlar, sonlu elemanlar ve düzleştirilmiş parçacık hidrodinamiği yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, merminin B₄C/C/UHMW-PE zırhını delmediğini, B₄C/UHMW-PE zırhını delip geçtiği görülmüştür. Simülasyonlar, UHMW-PE'nin penetrasyon mekanizmasını ve seramik ve çıkıntı deformasyonunun hasar durumlarını doğru bir şekilde yakalayıp, bu çalışma, deneysel testlerin sayısını azaltmada ve hafif kompozit zırh sistemlerinin tasarımında sayısal simülasyonların faydasını göstermektedir [22].

Nayak ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, twaron ve seramik malzeme kullanılarak 7,62mm'lik zırh delici mermilere karşı koruma sağlayacak bir zırh paketi testi gerçekleştirmişlerdir. Çalışılan testte 4mm 'lik zirkonyum ile geliştirilmiş alümina içeren deneyde, seramik malzeme 10mm ve 15mm 'lik twaron epoksi ve twaron polipropilen malzemelerle takviye edilmişlerdir. Çalışılan testler sonucunda

kullanılan malzemenin seramiğin parçalara ayrılmasını engellediği ve birden çok darbeye karşı daha çok dayanım sağladığı gözlenmiştir. Merminin tesir ettiği seramik parçanın parçalandığı ve yandaki seramik parçalarının darbeden çok etkilenmediği gözlenmiştir. Göz önünde bulundurulan eşit kalınlıklardaki twaron-polipropülen malzemenin twaron-epoksiye kıyasla daha yüksek balistik direncinin olduğu gözlenmiştir [23].

Serjouei ve arkadaşları tarafından yapılan araştırmada, matematiksel olarak modelledikleri, alüminyum ve seramikten oluşan iki katmanlı bir zırhın penetrasyon özelliklerini simülasyonlarla karşılaştırmışlardır. Bu çalışmada silisyum karbür, alümina ve bor karbür malzemelerin üçüne de uygulanacak katsayılar değiştirilerek yapılan bir matematiksel model üzerine çalışılmıştır. 5083 alüminyum ve 4340 çeliği metal katman olarak kullanılmıştır. Momentum ve enerji denklemleri kullanılıp, tüm seramik ile metal katmanlar için matematiksel denklemler oluşturulmuştur. Bu denklemlerin içinde belirtilen katsayılar, daha önce yapılan testlerden çıkarılan sonuçlar kullanılarak küçük kareler yöntemi ile çözümlenmiştir. Daha sonra denklemler net olarak belirlenmiş ve yeni değerler için simülasyonlar ile denklemden elde edilen değerler karşılaştırılmıştır [24].

Plonka ve ark. tarafından yapılan çalışmada, zırh levhalarında en çok tercih edilen seramiklerin arka kısmında kullanılan takviye plakalar için farklı alaşımlar imal ederek üzerlerinde balistik deneyler uygulamışlardır. Bu çalışmada silisyum karbür, alümina ve bor karbür malzemeleri seramik malzeme olarak kullanılmıştır. Takviye plakalar ise alüminyum, nikel, çinko, magnezyum ve silisyumdan oluşan alaşımlar kullanılmıştır. 7.62mm ile 12.7mm mermiler kullanılıp yapılan atışlarda en mükemmel sonuçları alüminyum, nikel ve silisyumdan oluşan alaşımlar vermiştir [25].

Godzimirski ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, alümina ve silisyum karbür seramik katmanları ile 2024-T3 alüminyum katmanları arasına çeşitli kompozit malzemeler yerleştirilip, 8mm'lik çelik mermilere karşı test edilmiştir. Microflex, CT709, T 750 ve XPS 102 olarak dört farklı aramid malzeme ile çalışılan çalışmada seramikler altıgen olarak kumaşlara yapıştırıldıktan sonra 2024 -T3 alüminyum plakalarla desteklenmiştir. Numunelerden bazılarında seramik kompozit malzemeye yapıştırılırken bazılarında da 0.3mm kalınlığa sahip olan alüminyum plakalar

yapıştırıldıktan sonra, kompozit malzemeye yapıştırmışlardır. Yapılan testler sonucunda 0.3mm kalınlığa sahip olan alüminyum plakalar kullanılan numuneler balistik bakımdan en iyi sonucu vermiştir. XPS 102 kullanılan numuneler ise kompozit malzemeler arasında en iyi balistik sonucu vermiştir [26].

Jongparojcosit tarafından yapılan çalışmada, seramik / metal zırh levhalarının şekillendirilmesinin balistik performansına olan etkisi çalışılmıştır. 30x30x9mm'lik alümina ile 30x30x9mm'lik alüminyum plakayla 15x9mm'lik alümina kullanılırken, yine aynı ölçüde kalınlığı farklı olarak 30x30x6mm alüminyum plakalar balistik etkileri karşılaştırılmıştır. Çalışılacak deney için 7.62mm'lik zırh delici mermi kullanılmıştır. Dört kez tekrarlanan testler sonucunda çıkan %75 oranında kare zırh levhalara kıyasla altıgen zırh levhalarının daha yüksek oranda balistik sonuç verdiği görülmüştür [27].

Hedayati ve Vahedi tarafından yapılan çalışmada, malzemenin absorbe ettiği enerjiyi hesaplayabilmek ve merminin balistik limitini bulabilmek için hidrodinamik method kullanılan simülasyonu, Rosenberg metodu ile karşılaştırmışlardır. Sonlu elemanlar programı olan ABAQUS programı kullanıp hidrodinamik modeli simülasyonunu yapan araştıranlar malzeme olarak 6061-T 651 alüminyum malzeme seçmişlerdir. Rosenberg metodu ile hidrodinamik metot kullanan simülasyon arasında benzerlikleri ve farklılıkları ortaya çıkaran araştırmacılar ilk önce iki metot arasındaki hata payının düşük hızlarda %10 civarında olduğunu gözlemlemişlerdir. Fakat çarpışma hızı yükseldikçe, Rosenberg metodu ile hidrodinamik metot aralarındaki oran düşmeye başlamıştır. 600m/s'den sonra hata payı %1'in altına düşmüştür. Absorbe edilen enerji arasındaki fark ise 850m/s hıza kadar %1'in üstünde kalmıştır [28].

Borvik ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada çelik plakaların balistik penetrasyonu incelenmiştir. Yapılan bu çalışmada Weldom 460 E kullanılmıştır. Penetrasyon işlemini incelemek için yüksek hızlı dijital kamera sistemi tercih edilmiştir. Deneysel sonuçlarda plakalardaki hasar tespit edilmiştir. Bu sonuçlar, Sonlu elemanlar kodu LS-DYNA kullanılarak karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonucunda yaklaşık %10 sapma tespit edilmiştir [29].

Borvik ve arkadaşları tarafından yapılan bir başka çalışmada, aynı malzemeden yapılmış tek katmanlı ve çift katmanlı zırhların davranışlarını deneysel ve sonlu elemanlar yöntemi kullanarak incelediler. Yapılan araştırmada, temas halindeki tek ve çift katmanlı yapıların balistik limit hızlarının birbirine eşit olduğu ve aralarında 30 mm boşluk bulunması durumunda balistik limit hızının düştüğü bulundu. Deneysel çalışmalar ve sonlu elemanlar yöntemi kullanarak yapılan analizler arasında uyumlu bir sonuç elde edildi ve hata payının %12'den az olduğu belirlendi. Araştırmacılar, çift katmanlı zırhın tek katmanlı zırha göre daha iyi performans gösterdiğini bulmuşlardır. İki katmanlı yapı, darbenin enerjisini emen özelliklere sahip iki farklı malzemeden oluşur ve bu sayede daha yüksek balistik dayanım sağlar. Ayrıca, aralara konulan boşluklarla ilgili yapılan testlerde, boşluğun artmasıyla zırhın balistik limit hızının azaldığı tespit edildi. Ancak, yine de, çift katmanlı zırhın tek katmanlı zırha göre daha yüksek balistik dayanıma sahip olduğu gösterildi. [30]

Flores-Johnson ve meslektaşları tarafından yapılan bir çalışmada, aynı malzemeden yapılmış tek katmanlı, çift katmanlı ve üç katmanlı yapılar ile farklı malzemelerin kombinasyonu ile yapılan yapılar incelenmiştir. Weldox 700E çeliği için, tek ve çift katmanlı yapılar arasında belirgin bir fark bulunmazken, üç katmanlı zırhın dayanımı daha düşüktür. Al 7075-T651 için, 20 mm kalınlığının altındaki tek ve katmanlı yapılar arasında önemli bir fark yoktur, ancak 30 mm kalınlığının üzerinde katman sayısı arttıkça balistik performansın üç katmana kadar düştüğü gözlemlenmiştir. Farklı malzeme kombinasyonları kullanılarak yapılan katmanlı yapılar, alan yoğunluğu eşit çeliklerle karşılaştırıldığında daha iyi performans göstermiştir. Ancak, 800 m/s ve 950 m/s hızlarda yapılan analizler karşılaştırıldığında, 950 m/s hızda katman sayısının artmasıyla balistik performansta düşüşün belirsizleştiği rapor edilmiştir. Sonuç olarak, katmanlı panel yapılar zırh alan yoğunluğunu azaltmak için kullanılabilir. Bu çalışma, balistik performansın optimize edilmesi için daha fazla çalışmaya ihtiyaç olduğunu göstermektedir. [31]

Chocron ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada 7,62 mm'lik APM2 mermisinin metalik bir hedefe çarpmasını incelemişlerdir. Bu tez çalışmasında, mermi çekirdeğinin hasar koşulları analitik, nümerik ve deneysel metodlarla karşılaştırılmıştır [32].

Warren ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada 4340 sivri uçlu çelik merminin belli bir açıyla alüminyum 6065 T6511 alaşımı hedef plakaya nüfuz etmesini deneysel ve simülasyon incelenmesi yapılmıştır. Çalışma içeriğinde deneysel, analitik ve sayısal nümerik sonuçlar birleştirilmiştir. Öncelikle deneysel olarak 0,021 kg, 7,11 mm çapında, 7,12 mm uzunluğunda 4340 çelikten yapılmış sivri uçlu mermi kullanılmıştır. Bu mermiler hızları 0,5 km/s ve 1,3 km/s arasındaki yüksek hızlı silahlarla, 254 mm çapında 15°, 30°, 45° li açıya sahip alüminyum 6061 T6511 hedef plakaya fırlatılmıştır. Oluşan deformasyon sonrası veriler hesaplanmıştır. Daha sonra aynı çalışma sonlu elemanlar kodu Transient Dynamic yöntemi ile simülasyonu yapılmış ve deneysel verilerle kıyaslama sonucu birbirleri ile uygun olduğu tespit edilmiştir [33].

Dey ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada çift tabakalı çelik plakaların balistik direnci deneysel ve nümerik olarak incelenmiştir. Yekpare ve iki katmanlı çeliklerin balistik limit hızları, düz ve ogival uçlu delici mermilerin etkisi altında hem deneysel hem de sayısal olarak incelenmiştir. Deneyde 12 mm kalınlığında Weldom 700E çeliği ve kombinasyonları kullanılmıştır. Genel olarak simülasyon ve deneysel sonuçların birbirine yakın değerler çıktığı gözlenmiştir. Yapılan deneysel ve sayısal çalışmalarda, yekpare ve iki katmanlı çelik yapıların düz ve ogival uçlu delici etkisi altında balistik limit hızları incelenmiştir. İki katmanlı yapıların balistik limit hızında düz uçlu delici kullanımıyla yaklaşık %50'lik bir artış sağladığı belirtilmiştir. Bu artışın sebebi, yapıların deformasyon ve hasar mekanizmasındaki değişikliklerdir. Ancak, ogival uç kullanımı durumunda balistik performansın iki katmanlı yapı ile azaldığı bildirilmiştir. Yani, ogival uçlu delici kullanıldığında, iki katmanlı yapılar daha az etkili olabilir ve balistik performans düşebilir. [34].

Arias ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, ince çelik plakalarda silindirik, konik ve yarım küre şeklindeki mermilerin davranışının etkileri nümerik simülasyonla incelenmiştir. Farklı mermi ucu geometrilerinin ince çelik plakalarda etkisi sonlu elemanlar kodu ABAQUS-Explicit ile nümerik simülasyonu yapılmıştır. Yapılan çalışmada John-Cook modeli kullanılmıştır. Farklı hız aralıkları ve farklı mermi uçları kullanılarak simülasyon sonuçları elde edilmiştir. Sonuç olarak nümerik sonuçların deneysel sonuçları doğruladığı tespit edilmiştir [35].

Flores ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada çok tabakalı metalik plakara 7,62 mm lik APM2 mermisinin çarpması sonucu balistik performansı incelenmiştir. Yapılan testler, nümerik olarak incelenmiş olup; tek, çift ve üç plaka halinde çelik, alüminyum ve bunların kombinasyonları şeklindedir. Çalışmalarda mermi hız aralığı 775-950 m/s arasında seçilmiş olup explicit sonlu elemanlar LS_DYNA kodları kullanılmıştır [36].

Babaie tarafından yapılan bir çalışmada çok tabakalı hedefe rijit mermi çarptırılarak merminin balistik direncini incelemişlerdir. Çelik ve alüminyum olmak üzere iki farklı tabaka kullanılmıştır. Tabakalardan alüminyum-alüminyum, alüminyum-çelik, çelik- alüminyum, çelik-çelik olmak üzere dört farklı kombinasyon meydana getirilmiştir. Deneyde mermi hızını 50 m/s ile 400 m/s arasında ayarlamak için basınçlı gaz tabancası kullanılmıştır. Deney sonuçları da non-lineer sonlu elemanlar kodu LS-DYNA simülasyonu kullanılarak karşılaştırılmıştır [37].

Mishra ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, temperleme sıcaklığının artmasıyla birlikte sertlik ve dayanım değerlerinin düştüğü ve bu durumun penetrasyon derinliğinde artışa neden olduğu gözlemlenmiştir. Yapılan çalışmada, temperleme sıcaklığının artmasıyla adiabatik kayma bantlarının sayısının azaldığı ve bu kaynaklı çatlakların sayısının da azaldığı tespit edilmiştir. Plaka kalınlığı azaldıkça, adiabatik kayma bantlarının oluşum nedeni olan yüksek gerilim ve deformasyon oranları da azalmaktadır. Bu nedenle, daha ince plakaların balistik performansı daha yüksek olabilir. Ayrıca, çelik yüzeyde delikli yapıların daha az veya daha kısa adiabatik kayma bantlarına sahip olduğu gözlemlenmiştir. Bu tür yapıların mermiyi kırdığı veya deformasyona uğrattığı için balistik dayanımı arttırdığı düşünülmektedir. Bu nedenle, balistik koruma için delikli yapıların kullanımı, daha yüksek dayanım ve daha düşük adiabatik kayma bantları nedeniyle avantajlı olabilir [38].

Mishra ve arkadaşları tarafından yapılan bir başka çalışmada, yüksek sertlik ve düşük süneklikte malzemenin kullanıldığı ön katman ve yüksek süneklikte malzemenin kullanıldığı arka katman kombinasyonunun, zıttı dizilime göre daha başarılı olduğu belirtilen bir çalışmada, bu etkinin düz uçlu yapılarda daha belirgin olduğu ancak ogival uçlar için farkın daha düşük olduğu ifade edilmiştir. Ogival uçların mermi bütünlüğünü daha iyi koruduğu ve çok az deformasyona uğradığı, ancak düz uçların boyca değiştiği

ve kütle kaybına uğradığı ifade edilmiştir. Katman diziliminin mermi deformasyonuna etkisinin önemsiz olduğu sonucuna varılmıştır. Yapılan araştırmalar, darbe hızının artmasıyla birlikte hedef konfigürasyonunun balistik limit hızına olan etkisinin azaldığını ortaya koymuştur. Yani, daha yüksek darbe hızlarında hedef konfigürasyonu, balistik performans üzerinde daha az belirleyici bir faktör olarak görülmektedir. Ayrıca, yüksek sertlikteki çelikten yapılan ön katman ve alüminyumdan yapılan arka katman için yapılan bir çalışmada, delikli yapının balistik başarıyı arttırdığı belirtilmiştir. Gözlemler, dairesel deliklere kıyasla kare şeklindeki deliklerin daha etkili olduğunu ve delik boyutunun da önemli bir faktör olduğunu ortaya koymaktadır [39].

Teng ve arkadaşlarının [40] yaptığı araştırmada, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak iki katmanlı zırhların balistik performansı incelenmiştir. Düz uçlu mermi kullanıldığında, iki katmanlı yapıların yekpare yapıya göre %8 ila %25 oranında daha yüksek bir balistik performans sergilediği tespit edilmiştir. Düz uçlu delici mermilerin neden olduğu hasar modu enerji sönmüleme kabiliyeti düşük olan delinme iken, çekme ile uzama hasar modu enerji sönmüleme kabiliyeti daha yüksek olduğu için daha etkili bir şekilde hasar oluşturmaktadır [41]. Bu nedenle, çekme ile uzama hasar moduna neden olan mermiler için çok katmanlı yapılar daha yüksek balistik dayanım göstermektedir. Konik uçlu mermiler için ise, tek katmanlı ve çok katmanlı yapılar arasında bir fark gözlenmemiştir. Ayrıca, yüksek ve düşük süneklığe sahip iki farklı çelik için yapılan bir diğer çalışmada, tek ve çok katmanlı yapılar üzerinde konik ve düz uçlu delici mermiler kullanılarak analizler yapılmıştır. 400 m/s ve 800 m/s hızlarda gerçekleştirilen atışlar sonucunda, balistik dayanımlar arasında farklılıklar belirlenmiştir. Bu çalışmanın sonuçları, atış hızının malzemenin hasar mekanizması ve balistik performansı için önemli bir faktör olduğunu ve yüksek performanslı kombinasyonların atış hızına bağlı olarak değişebileceğini göstermiştir.

Wei ve meslektaşları tarafından yapılan bir araştırmada, yekpare, katmanlı ve boşluklu katmanlı zırh yapılarının balistik limit hızları karşılaştırılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda, yekpare yapının hasar modu membran uzaması da içeren eğilme olduğunda, katman sayısının artmasıyla balistik limit hızının azaldığı tespit edilmiştir. Ancak, yekpare zırhın baskın deformasyon mekanizması kayma ise, yekpare hedefin balistik limit hızı katmanlı hedeften daha düşük olmaktadır. Katmanlar arasında boşlukların temas etmesi durumunda, balistik limit hızı azalmıştır. Ara boşluklu

katmanlı yapılar arasında, ara boşlukların artırılmasının balistik performansı artırdığı gözlemlenmiştir. Bu çalışmada, düz uçlu bir delici kullanılmıştır [42].

Woodward ve Panda [43] tarafından yapılan bir çalışmada, yekpare ve katmanlı alüminyum alaşımlarının balistik performansları incelenmiştir. Bu çalışmada, konik uçlu ve düz uçlu mermilerin etkileri de araştırılmıştır. Yapılan incelemeler sonucunda, kalın yekpare hedeflerin delinme ile deforme olduğu ancak katmanlı yapıların darbe yüzeyinde girinti şeklinde ve çıkış yüzeyinde parça ayrılma mekanizması ile deforme olduğu belirlenmiştir. İnce katmanlı yapıların ise enerji sönümleyen parça ayrılması ile daha yatkın olduğu ifade edilmiştir. Ayrıca, bu çalışmada polikarbon ve alüminyum malzemelerin yekpare ve katmanlı yapılarının balistik dirençleri de incelenmiştir. Yapılan analizler sonucunda, polikarbonun yüksek alan yoğunluğu nedeniyle daha başarılı olduğu ancak yekpare yapının balistik direncinin bitişik katmanlı yapıdan daha üstün olduğu tespit edilmiştir. Boşluklu katmanlı yapının balistik dayanımının ise bitişik katmanlı yapıya göre daha düşük olduğu ancak yekpare durumla kıyaslandığında dayanım düşüşünün boşluk etkisinden ziyade katman etkisinden kaynaklandığı rapor edilmiştir. Ayrıca, iki farklı malzemenin kombine edilmesi durumunda dahi sistemin balistik limit hızının yekpare durumundan daha düşük olduğu gözlemlenmiştir.[44]

Holmen ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada [45], katmanlı ve yüzeyi sertleştirilmiş çelik zırhların 7.62mm zırh delici mermilere karşı balistik performansı deneysel ve sayısal olarak araştırılmıştır. Çalışmanın sonuçları, yüzeyi sertleştirme işleminin balistik limit hızını en az %20 artırdığını gösterirken, katmanlı yapıların balistik limit hızını artırmadığını ortaya koymuştur. Ayrıca, katmanlı yapılar, yüzeyi sertleştirilmiş çelik yapıların balistik dayanımını ham çelik yapıya göre daha da azaltmıştır. Ham plakaların sayısal analizi, deneysel verilerden yaklaşık %11 daha düşük sonuçlar vermiştir ve katman sayısının artmasıyla bu sapmanın arttığı belirtilmiştir.

Abdel-Wahed ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada 7.62x39 zırh delici mermilere karşı 3 mm kalınlığındaki yekpare, katmanlı ve 5 mm boşluklu katmanlı zırh tasarımlarının balistik dayanımları incelenmiştir. Araştırma sonuçlarına göre, literatürde de belirtildiği gibi, yekpare zırhların en yüksek balistik dayanıma sahip

olduğu görülmüştür. Ancak, farklı olarak, 3 katmanlı temaslı zırhların 2 katmanlı zırhlardan daha üstün olduğu tespit edilmiştir [46].

Zaera ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada, metal ve seramik plakalar arasındaki adezif katmanın etkisi, farklı adezif katman kalınlıkları ve ara yüzey malzemeleri kullanılarak incelenmiştir. Daha kalın adezif katmanlar kullanılan zırh tasarımlarında, arka metal plakanın plastik deformasyon alanının daha genişlediği ve kinetik enerjinin daha fazla sönmüldüğü gözlemlenmiştir. Ancak, adezif katmanın kalınlığının artması, seramik katmanın daha erken bir şekilde parçalanmasına sebep olmuştur. Bu durumun zırhın dayanıklılığına olumsuz etki ettiği ve balistik performansı daha fazla etkilediği düşünülmüştür. Dolayısıyla, adezif katman kalınlığının mümkün olduğunca azaltılması gerektiği önerilmiştir [47].

Taşdemirci ve çalışma arkadaşları, seramik ve cam elyaf takviyeli kompozit zırhın ara yüzeyinde farklı malzemelerin kullanılmasının zırhın performansına etkisini araştırmışlardır. Hem deneysel hem de nümerik yöntemler kullanılarak, kauçuk, teflon ve alüminyum köpük malzemelerinin zırhın performansına etkisi belirlenmiştir. Ara yüzey malzemesinin, katmanlar arası gerilim dalga iletimini etkilediği ve kauçuk malzemenin kompozit katmanda ilk gerilim oluşumunu etkilemediği bulunmuştur. Teflon ve alüminyum köpük malzemelerinin ise ilk gerilim oluşumunda önemli bir gecikmeye neden olduğu ve kompozit arka plakaya iletilen gerilme büyüklüğünü azalttığı belirtilmiştir. Ayrıca, seramik katmanda meydana gelen hasarın, kauçuk ara yüzeyde daha az olduğu ve ara yüzey malzemesinin kullanılmadığı durumlarda mermi darbe bölgesine yoğunlaştığı tespit edilmiştir. Teflon ve köpük kullanımı ise hasar bölgesinin radyal yönde genişlemesini sağlamıştır. Sonuç olarak, ara yüzey malzemesinin seçiminin zırhın balistik performansını önemli ölçüde etkilediği sonucuna varılmıştır [48].

3. BALİSTİK

3.1. Balistik Nedir?

Mekaniğin alt dallarından biri de Balistik bilimidir. Rastgele seçilen bir cismin fırlatılmasıyla seçilen bir hedefe varışına kadar olan zamanda oluşan durumları balistik bilimi gözlemlemektedir. Eski Yunanca’da “atma” manasına gelen balistik bilimi antik çağlardan bu yana silahlar üstünde çokca etkisi olduğu gözlenmiştir. Örnek olarak; Roma Ordusu’ndaki “balista” aynı kökenden gelmektedir. Balistalar Roma lejyonlarının başarısında büyük paya sahibidir. Balistalar eğik atış prensibini kullanarak düşmanlarını çok uzak mesafelerden bile vurabilmekte idi. Balistik bilimindeki en önemli gelişmelerin başında Newton’un 1687 ’de yazdığı “Doğa Felsefesinin Matematiksel İlkeleri” adlı yapıtıyla yaşanmıştır. Yer çekimiyle maddelerin hareketi ile ilgili Newton ’un iddia ettiği prensipler ile beraber balistik biliminde de kayda değer gelişmeler yaşanmıştır. Günümüzde savaş alanlarının vazgeçilmezi olan topların atışlarının menzili ve topların atış gücü Newton ’un yasalarından fikir alınarak daha yüksek teknolojiye duruma gelmiştir. Daha sonra Gaetano Marzagaglia, 1748 yılında yayımladığı Del Calcolo Balistico adlı eserinde balistik biliminin temel kurallarını belirterek, balistiğin mekaniğin bir alt dalı olarak ortaya çıkmasını sağlamıştır. Bu çalışma, balistik alanında yapılan ilk sistematik ve ayrıntılı inceleme olarak kabul edilmektedir ve sonraki yıllarda balistik biliminin gelişimine önemli katkılar sağlamıştır.

3.1.1. Balistiğin Bölümleri

İç balistik, dış balistik, terminal balistik bir diğer deyişle hedef balistik olarak balistiğin bölümleri üç ana başlığa ayrılmıştır, bu üç ana başlık özelinde araştırılmaktadır.

3.1.1. İç Balistik

Merminin, mermi yatağına sürülmesinden başlayıp, ateşli silahların mekanik yapısını, çalışmasını, patlamasının gerçekleşmesini, mermi üzerindeki etkisini ve mermi çekirdeğinin silahtan tamamen çıkana kadarki hareketlerini incelemektedir.

Gerçek hayatta barut ateşlendiğinde aniden yanmamakta buna bağlı olarak zamanla yükselen bir gaz hacmi meydana gelmektedir. Bu da basıncı çoğaltarak mermiyi ileri doğru itmektedir. Ancak gazların etkisindeki dolaylı alan büyüyünce, basınç da aynı oranda azalmaktadır. Bundan dolayı yavaş yanan barutlar ve uzun namlular kullanılarak basıncın sabit tutulması çalışılmaktadır. Bu uzun namlular gazların etkisini arttırarak, namluları fazla zorlamadan büyük ilk hızlar elde edilmesini sağlamaktadır [49].

İç balistik olayı tetiğe basılmasıyla başlamaktadır. Merminin namluyu terk ettiği ana kadar sürmektedir. İç balistik hesaplamaları, mermi yüksek boyutlarda olduğu zaman matematiksel açıdan güvenilir bir şekilde tahmin edilebilmektedir. Mermi küçük boyutlarda olduğunda doğru tahmin etmek oldukça zor olmaktadır. Eski tarihlerde balistik veriler ufak mermiler için hesaplamalar yerine hız testi ve basınç testi metotları ile ya da ampric metotlar ile tespit edilmiştir. Çok fazla çekirdek ve barut alternatifini içeren ufak boyutlardaki merminin atış test çalışmaları yaparak performans değer sonuçları alınmakta idi. Bu çalışmalardan yeteri miktarda sonuç açığa çıkarılmakta ve ses balistik verileriyle beraber değerlendirilerek az boyuttaki mermiler için kabullenilebilir veriler alınmakta idi. Bilinmekte olan kinetik enerji denklemi ($E=1/2mv^2$) baruttan açığa çıkan enerji miktarı ile denkleştirildiğinde merminin hızı kabullenilebilir gerçeklikte hesaplanabilmektedir. Normal şartlar altında ortaya çıkan enerjinin minik bir kısmı merminin hareketinde kullanılmaktadır. Brownng Tüfekleri için Tablo 3.1 'deki alanları verilmiştir [50].

Tablo 3.1. Barut Kullanılarak Elde Edilen Enerjinin Kullanım Alanları

Merminin yatağını ısıtılma	%4
Çekirdeğe verilen kinetik enerji	%29
Gazlara verilen kinetik enerji	%19
Namluyu ısıtılma	%22
Gazları ısıtılma	%19
Merminin sürtünmesi	%7
Toplam	%100

Tablo 3.1' den görüldüğü üzere toplamdaki enerjinin sadece %29 'u merminin hareket etmesi için kullanılmaktadır. Ufak mermiler için bu yüzde %17-37 arasında değişmektedir.

3.1.1.2. Dış Balistik

Merminin namludan çıktıktan sonra belirlenen alana çarpmana kadar olan zamandaki davranışlarını araştıran balistiğin alt dalı dış balistikdir. Dış balistiğin alanlarına giren alt dalları; merminin uçuş süresi, izlediği yol, hedefe çarpma hızı, hedefe varış noktası ve hedefe çarpma açısıdır.

Füze ya da mermiye etkileyen yerçekimi, atelet ve hava ile etki eden aerodinamik kuvvetlerin varolması durumunda, dönüş alanlarının hesaplanmasında önemli bir zorluk görülmektedir. Fakat, aerodinamik kuvvetlerin bilinmesi durumu zor olmaktadır.

Bir mermi; havanın direncini yenmek, ortadan kaldırmak ve stabil diğer bir deyişle dengesi sağlanmış bir uçuş gerçekleştirmek amacıyla havada durduğu uçuşun süresi zamanında hedefe doğru ilk hareket hızında ilerlemelidir. Ancak, merminin pozisyonu çıkış yaptıktan sonra değiştir ise ve hatta takla atar ise, bu uçuşun başlarken planlandığı, düşünüldüğü gibi bir neticeye ulaşamamasına ve belirlenen alana düşmemesi ile sonuçlanacaktır. Uçuş stabilitesini yani dengesni ve kararlılığını sağlamak maksadıyla 2 yöntem vardır. Birinci yöntem, kanatçık stabilizasyonu iken ikinci yöntemi dönme yani spin stabilizasyonudur. Kanatçık stabilizasyonunda, kanatçıklar mermiye eklenip, merminin kendi yörüngesinde dönmeden, hareket etmesine yardımcı olmaktadır. Bu durum kanatçıklar üzerinde açığa çıkan aerodinamik etkilerin aracıyla sağlanmaktadır. Dönme hareketine sahip olan fişegin veya merminin ise kendinde içerdiği spin hareketinden dolayı devamlı ilk hedef yönü boyunca hareketini sürdürmektedir. Söz konusu dönme hareketinin ataleti, gerçekleşmesi beklenen doğru eksenin aksine olan sapmaları engellemektedir [10].

3.1.1.3. Terminal Balistik

Merminin seçilen alan üzerinde oluşturduğu etkileri incelenen balistik çeşididir. Bu etkiler , hedefte patlama etkisi, zırhlı hedefleri delinme, hedefte parça tesiri, hedefin aydınlatılması, hedefte yangın tesiri, zehirli gaz, sis ve radyoaktif etkilerdir. Terminal balistik, hedef balistiği olarak da adlandırılır [51].

Mermi çekirdeğinin seçilen alana çarpmasının ardından, durma anına kadar yaptığı delme gücü, enerjisini çarptığı cisme iletmesi gibi etkilerle ilgilidir [52].

Terminal balistik, parçacıklar ve merminin, hedef üzerinde etkilerini incelenmesi olarak tanımlanır. Mermi ve parçacıklarının hedefe vuruş şartları, vuruş açısı, vuruş hızı, mermi, hedef ve parçacığın çeşidine göre farklılıklar göstermektedir [53].

3.2. Hasar Mekanizmaları

Belirlenen bir kaynaktan belirlenen bir güç ile itilen merminin açığa çıkardığı yüksek hızdaki düşük kaliteli çarpma balistik çarpma olarak tanımlanmaktadır. Balistik çarpmanın etkileri, çarpmanın meydana geldiği noktaya yakın bir bölgede gerçekleşir. Enerji transferi, mermiden hedef malzemeye doğru ilerleyerek temas anında gerçekleşir. Bu enerji transferi, hedef malzemesinin özellikleri ve mermiye ait parametrelerle ilişkilidir. Balistik çarpmanın etkileri, hedef malzemesinin özelliklerine ve mermiye ait parametrelerin değerlerine bağlı olarak farklı şekillerde ortaya çıkabilir;

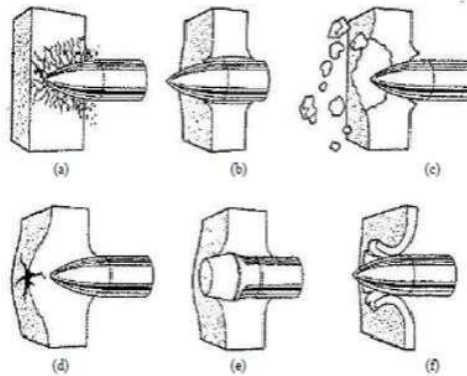
- Merminin levhaya çarpması, merminin ilk enerji seviyesinin levhanın absorbe edebileceği enerji seviyesinden daha düşük olduğunu gösterir. Bu nedenle, mermi hedef malzemesinin özelliklerine göre tamamen içeri girip, içeride kalabilir veya durabilir.
- Mermi, levhaya çarptığında levhayı delip, levhanın arka yüzünden belirli bir hızda çıkabilir. Bu durum, merminin ilk baştaki enerjisinin, levhanın sönümleyebileceğinden daha yüksek olduğunu gösterir.

- Mermi, levhayı tamamen deformasyona uğratarak deler ve levhanın diğer tarafından çıkış hızı sıfırdır. Bu durumda, verilen kütle için, merminin başlangıçtaki hızı balistik sınır olarak adlandırılır. Hatta merminin başlangıçtaki enerjisinin tamamı, sadece hedef tarafından absorbe edilerek sönmülenebilir [54].

Hedef balistiği, mermilerin hedeflerdeki nüfuz etme yeteneklerini inceler. Bu süreçte, mermi hedefin herhangi bir noktasına girebilir. Fakat, bu nüfuz etme işlemi mermi ve hedefin birçok farklı değişkene bağlıdır. Bu değişkenler, mermi hızı, burun şekli, malzeme özellikleri, yörünge ve hedef boyutları gibi faktörleri içerir. Mermi hedefe çarptığında meydana gelen hasarlar ise, yukarıdaki faktörlere bağlı olarak değişiklik gösterebilir.

Düşük yoğunluklu hedeflerde, kırılmalar genellikle gevrek şekilde oluşur ve başlangıçtaki gerilmenin dayanım değerini aştığı durumlarda ortaya çıkar. Kalın levhalar gibi orta sertliğe sahip malzemelerde ise delinme ile birlikte küçük parça kopması meydana gelir. Sünek malzemelerde ise sünek delinme sık rastlanan bir hasar şeklidir. Ayrıca, sünek malzemelerde farklı deformasyon şekilleri görülebilir, örneğin dolgu oluşumu veya taç yaprağı oluşumu. [54].

Mermi hedefi vurduktan sonra oluşan bütün hasar mekanizmaları aşağıdaki şekilde gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Hasar Mekanizmaları Örnekleri

- | | | |
|-------------------|-------------------|----------------------------|
| a) Gevrek Kırılma | c) Parça Kopması | e) Tıkaç Oluşumu |
| b) Sünek Delinme | d) Radyal Çatlak, | f) Taç Yaprak Oluşumu [55] |

3.3. Balistik Standartlar

Zırhların sınıflandırılması oldukça kritik bir konudur. Zira, herhangi bir tehdit karşısında sağlanacak koruma seviyesi ile birlikte zırhın taşınabilirliği sorunları, tasarımcılar için her zaman önemli parametreler arasında yer almaktadır. Bu nedenle, hangi zırhın hangi seviyede koruma sağlayacağına dair belirlenmiş standartlar mevcuttur ve zırh tasarımları bu standartlara göre gerçekleştirilmektedir. Bununla ilgili olarak; Avrupa Balistik Standartları ‘‘CEN- European Committee for Standardization’’ , Amerika Birleşik Devletleri Ulusal Adalet Kurumu standartları ‘‘NIJ- The National Institute of Justice’’ , Birleşik Krallık Standartları ‘‘HOSDB- Home Office Body Armour Standard’’, Rusya Federasyonu Standartları ‘‘GOST- Gosudarstvennyy Standart’’ ve NATO Standartları ‘‘STANAG- Standardization Agreement’’ gibi birçok standart bulunmaktadır.

STANAG, Standartlaşma Anlaşması, NATO’ya üye ülkeler arasında askeri alandaki standartlarını belirleyen anlaşmadır. Operasyonel olarak bir NATO askeri birimi, aynı standartlarda üretildiği için mühimmatını veya araçlarını başka bir ülkenin topraklarında rahatlıkla kullanabilmektedir. STANAG 4569 standardı, Standardization Agreement kelimelerinin kısaltılmasıdır. NATO’nun Hafif Zırhlı Araçlar için belirlediği standarttır. Tablo 3.2 ‘de STANAG 4569 koruma seviyeleri yer almaktadır.

Tablo 3.2. Stanag4569 Standardı

Seviye	Mermi Tipi	Mermi Hızı (m/s)	Tehdit Tipi	Mesafe
1	5.56mmx45 M 193	937	Pirinç Kaplamalı Tüfek	30m
1	5.56mm45 NATO	900	Pirinç Kaplamalı Tüfek	30m
1	7.62mmx51 NATO	833	Pirinç Kaplamalı Tüfek	30m
2	7.62 mmx39 APIBZ	695	Zırh Delici Çelik Çekirdek Tüfek	30m
3	7.62mmx54 R B32API	854	AP Tungsten Çekirdek Tüfek	30m
3	7.62mmx51 AP	930	AP Tungsten Çekirdek Tüfek	30m
4	14.5mmx114 API / B32	911	Ağır Makineli Zırh Delici Mühimmat Tüfek	200m
5	25mmx137 APDS- T	1258	Zırh Delici Sabot Mermi	500m

4. ZIRHLAR

Geçmişten günümüze insanlar binlerce hatta milyonlarca savaşa katılıp, bu savaşlar dışında da çok tehlikeli durumlarda kendini zarar görmekten koruma amacı ile farklı özelliklere sahip malzemeler kullanılmıştır. Koruyucu örtü olarak tanımlanan zırhlar, çeşitli etki veya saldırı biçimlerine karşı korunmak amacıyla tasarlanmışlardır ve zaman içinde sürekli geliştirilmişlerdir.

Kemikli yapılardan ve hayvan derisinden başlayarak bronz, çelik, balistik giysi ve seramiklere kadar tarih boyunca çok çeşitli zırhlar kullanılmıştır. Ateşli silahların yaygınlaşması ile birlikte, onların darbelerine ve etkilerine karşı durabilecek kapasite ve özelliklerde zırhlar keşfedilmiştir. Zırhları delerek geçebilme özelliği gösteren mermilerin araştırma yapıp, üretildiğindeyse bu mermilere karşı koymak için farklı zırh tasarımları ve modelleri geliştirilmiştir. Yalnızca metal malzemeler kullanılarak değil, aynı zamanda polimer kompozit, seramik kompozit ve tabakalı zırh gibi çeşitli malzemelerin kullanımıyla da farklı sistemler oluşturulmuştur. Bu zırh sistemleri, yüksek hızlı mermilere karşı koruma sağlamak için geliştirilen özel tasarımlar içermektedir.

Temel fikir, oldukça sert bir yüzeyle veya arkada sünek, geliştirilen zırh malzemelerinde yumuşak malzeme kullanılıp geliştiril bu sayede zırh kademelerinde merminin etkisini ve hızını kesip, enerjisini sönmüleyip ve hatta yok edebilmektedir. Burada ana amaç maksimum seviyede korunma olmakla birlikte hareket yeteneğinin de kısıtlanmamasıdır.

Günümüzde kullanılan farklı türlerdeki zırhlar şunlardır:

- Rulo halindeki Levha Zırhlar
- Dökme Zırhlar
- Derin Çekme Zırhlar
- Dövme Zırhlar
- Çoklu Bileşenli Zırhlar
- Şeffaf Zırhlar

- Fiber Takviyeli Plastik Zırhlar
- Seramik Zırhlar
- Patlayıcı Madde İçeren Zırhlar
- Kişisel Zırhlar [56].

Kalınlık sınırları belirli bir düzeye kadar olmakla birlikte, alüminyum ve çelik malzemeleri ile alaşımlandırıp, haddeleme işlemine tabi tutulmuş levhalar zırh grubunda bulunan malzemelerdir. Çelik zırh malzemesi, alüminyum maliyetinin düşük olması, üretim kolaylığı ve yapısal verimliliğinin daha iyi olması gibi nedenlerle tercih edilmektedir [12]. Zırh çelikleri, östenitleştirme ve su verme aşamalarını içeren ıslah çelikleri ile benzer kimyasal bileşime sahiptir. Darbe kuvvetine karşı kırılma, çatlama veya parçalanma gibi sonuçlar oluşmaması için homojen bir içyapıya sahip olmalıdır. Yüksek tokluk değerlerinde olmaları beklenen mermilerin aynı zamanda darbe ve kuvvete direnç gösterebilmeleri için yüksek mukavemet ve sertlik özellikleri talep edilmektedir. Bu özellikler, uygun şartlarda yapılan ısıtma işlem adımlarıyla elde edilebilir. Kükürt ve fosfor oranı mümkün olan en düşük seviyeye düşürülerek mukavemet ve sertlik özelliklerinin yükselmesi ile tokluk değerinde azalmaların önüne geçilmektedir. Kaynak edilebilirliği sağlamak için karbon oranı düşük tutulmaktadır [57]. Kaynak bölgesinin balistik olarak detaylı bir şekilde incelenmesi ve değerlendirilmesi oldukça kritik bir öneme sahiptir. Yüksek mukavemetli düşük alaşım çeliklerinde bulunan kaynak bölgesine etkiyen mermilere karşı, korumalı ark kaynağı, tungsten ark kaynağıyla karşılaştırıldığında daha başarılı sonuçlar vermektedir [58].

Seramik malzemeler, yüksek sertlik ve düşük yoğunluk özellikleri nedeniyle zırh malzemesi olarak oldukça idealdir. Seramiklerin takviye malzemesi olarak kullanılması, çarpışmada temas eden yüzeylerinde kullanılmalarıyla mümkündür. Sert yüzeyli seramik malzemeler, alüminyum, çelik ya da cam elyaf takviye edilen plastik malzemeler gibi sünek yapıdaki destek katmandan yapılan iki bileşenli zırh sistemlerinde kullanılabilir. Ayrıca, kompozit veya metal levha ile desteklenen seramik yüzeyli zırhlar ağırlıktan tasarruf sağlamak için tercih edilir. Seramik zırh malzemelerinin seçiminde, yük miktarına göre açığa çıkabilecek zarar ve tehditler göz önünde bulundurulur. Alüminyum nitrat (Al_2O_3)₃, alüminyum oksit (Al_2O_3), bor karbür (B_4C) veya silisyum karbür (SiC) malzemeleri, seramik malzemenin yapımında

kullanılan malzemelerdir. Seramik malzemelerin mermiyi aşındırmada ve köreltmede etkili olduğu, destek katmanının ise merminin ardında bıraktığı kinetik enerjiyi sönümlemede büyük bir etkisi olduğu belirtilmektedir [59].

4.1. Zırh Çeşitleri

4.1.1. Pasif Zırhlar

Pasif zırhın ortaya çıkması zırhın tarihine göre oldukça yeni sayılmaktadır. 1970'li yıllarda çıkan reaktif zırh teknolojisiyle beraber bu tarihe kadar kullanılmakta olan zırhlar artık pasif zırhlar olarak adlandırılmaktadır. Bunun nedeni bu tarihe kadar kullanılmakta olan zırhlar balistik tehdidin hedefi vurmasından sonra kalınlık ve sertlikleri ile bir koruma sağlamayı amaçlamaktadır. Pasif zırhlar, tek tek veya bir arada kullanılarak, araçların veya kişilerin korunması için kullanılan farklı malzemelerin kombinasyonlarından oluşan bir dizi zırh sistemleri oluşturabilirler. Bu kombinasyonlar, farklı türlerdeki saldırılar için farklı düzeylerde koruma sağlamak için optimize edilebilir. Örneğin, sıvı zırhlar, metal zırhlar veya seramikler, birbirleriyle veya diğer malzemelerle birleştirilerek daha etkili bir koruma sağlamak için kullanılabilirler. Bu şekilde, çok katmanlı bir zırh sistemi oluşturulabilir ve daha güçlü bir koruma seviyesi sağlanabilir.

4.1.1.1. Sıvı Zırhlar

Newton'un viskozite yasasına uymayan sıvı maddeler Newtonsal olmayan sıvılar olarak adlandırılmaktadır. Newton'un viskozite kanununda malzemenin akışmazlığı yani viskozitesi üzerine uygulanan basınçtan bağımsız iken Newtonsal olmayan sıvılarda bu durum tam zıttır. Orta veya düşük seviye basınçlarda Newtonsal bir sıvı gibi hareket etseler de yüksek basınca maruz kaldıkları zaman Newtonsal olmayan sıvılar katı maddelere yakın bir davranış sergilerler. Sıvı zırhların üretimi de Newtonsal olmayan sıvılar kullanılarak yapılmaktadır.

4.1.1.2. Metal Zırhlar

Geçmişı çok eski çağlara dayanarak günümüzde de metal zırhlar en sık kullanılan zırh türüdür. Metal zırhların temel avantajı yorulma kaynaklı ve yapısal yükleri taşır iken bir diğ er taraftan da etkili bir koruma sağlamaktadır. Dahası benzeri sertlikte birçok maddeye göre ucuzdur ve bu da tercih edilmesindeki önemli etkenlerden birisidir.

Çelik en sık kullanılan metal zırh tipidir. Sertlik, tokluk, yorulma dayanımı, üretim ve maliyeti sebebiyle metaller arasında ö ne çıkan çelik malzemeler özellikle araçların gövdelerinde kullanılmaktadır. Yüksek sertlikte çelik (HHA), haddelenmiş homojen zırh çeliğı (RHA), değışken sertlikte çelik (VHS) gibi çeşitleri bulunmaktadır [60].

Bir diğ er sık kullanılan metal zırh çeşidi alüminyumdur. Çeliğ e kıyasla alüminyumu ö ne çıkaran en önemli avantajı yoğunluğ unun düşük olmasıdır. Alüminyum ile zırhlandırılan bir araç, çok daha fazla hafif olmasından dolayı, çelik ile zırhlandırılan araca göre çok daha fazla seri hareket edebilme kabiliyeti sağlamaktadır. Bunun yanı sıra çekme mukavemeti 60 ila 600MPa arasında değış en alüminyumun özellikle kinetik enerji tehditlerine karş in etkili bir koruma sergileyebildiğı görölmektedir. Ayrıca alüminyum zırh malzemeleri ile ilgili dezavantajlar da yok değıldir. Ö rnek verilecek olursa alüminyumdan yapılan zırh alaşımları korozyon çatlakları oluşumu eğ ilimi göstermektedirler. Özellikle çekmeye bağı lı olarak alüminyum malzemelerinde korozyon çatlakları diğ er metallere kıyasla daha çok görölmektedir. Korozyon çatlakları malzemelerin çekme dayanımını düşürmektedir. Bundan dolayı da balistik koruma kapasitesi azaltılmaktadır. Bunun yanı sıra araç içinde parça tesirinden korunmak için bir koruma katmanına ihtiyaç duyulmaktadır bunun nedeni, alüminyum zırhlar ufalanmaya karş i da dayanıksızdırlar.

Titanyum zırh; çelik ve alüminyumdan sonra en çok kullanılan metal zırh çeşididir. Yüksek mukavemeti, düşük yoğunluğ u ve sertliğı ile diğ er metallerin arasında ön plana çıkmaktadır. Titanyumun mekanik özellikleri; 900-300 MPa çekme mukavemeti, BHN 300-350 sertlik olarak düşünölebilir. Titanyum zırhın dezavantajı

maliyetinin çok yüksek olmasıdır. Bundan dolayı kullanım sırası çelik ve alüminyuma göre daha geride kalmaktadır [61].

4.1.1.3. Seramik Zırhlar

Balistik koruma amacı ile kullanılan seramikler çok fazla kırılğan ve sert yapıda malzemelerdir. Seramiklerin balistikte kullanım amacı, merminin ucunu kırnak suretiyle hasar etkisini azaltmasıdır. Seramikler özellik ile zırh delici tehditlere karşın zırhlardaki nüfuziyetini engellemektedir. Bunun yanı sıra metallere göre daha düşük yoğunluktaolmaları da taşınabilirlik bakımından önem arz etmektedir. Ayrıca seramik malzemeler gevrek olduğundan dolayı zırh delici mermileri durdurabilmek amacıyla metalik zırhların ön tarafına eklenerek kullanılabilmektedir.

Balistik için kullanılmakta olan birkaç tip seramik bulunmaktadır. Bu tiplerin başında Alümina, Bor Karbür ve Silisyum Karbür gelmektedir.

4.1.1.3.1. Alümina (Al_2O_3)

Deniz ve kara araçlarının zırhlanmasında ekonomik olarak düşük olmasından kaynaklı olarak sıkça kullanılmaktadırlar. Kullanıcının ağırlık gereksinimlerini karşıladığı müddetçe Alümina seramiklerle birlikte her türlü tehtide karşın çözüm oluşturulabilmektedirler. Şekil 4.1’de alümina seramik gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Altıgen Alümina Seramik

Dış görünüm olarak beyaz bir toz olan alümina, 2050°C ergime sıcaklığı ve 2080°C kaynama noktasısıcaklığı olan alümina yüksek sıcaklıklarda kimyasal maddeler ile mekanik yüklere karşı en sağlam direnç gösteren refrakter malzemelerden birisidir. 101,96g/mol molekül ağırlığına sahip olan alümüne reaktif indeksi 1.765'tir. Ayrıca oluşum serbest enerjisi de -1582,4kJ/mol 'dür. Toz metalürjisi yardımıyla üretilen alümina tozları, preslendikten sonra atmosfer fırınlarında sinterlenmektedirler. Çizelge 2.1'de %85–99,7 saflıkta alüminaların mekanik ve fiziksel özellikleri verilmiştir [62].

Tablo 4.1. %85-99.7 Saflıktaki Alüminanın Mekanik ve Fiziksel Özellikleri

Alümina içeriği, (%)	85,0	95,0	99,7
Yoğunluk, g/cm ³	3-3,5	3,7	3,9
Dielektrik sabiti	8,5	9,2	9,0-10,1
Dielektrik mukavemeti, kV/mm	28	---	10-35
Hacim direnci, Ω .cm (600°C'de)	4×10^6	5×10^9	4×10^{10}
Termal iletkenlik, W/m °C	15	20	28-35
Termal genleşme katsayısı, $10^{-6} / ^\circ\text{C}$	(20-1000°C) 7	7,6	8
Maksimum kullanım sıcaklığı, °C	1300	1500	1700
Spesifik ısı, J/K kg	920	900	---
Eğme mukavemeti, MPa (20°C'de)	300	350	350
Basma mukavemeti, MPa (20°C'de)	1800	2000	2200-2600
Elastik modül, GPa	260-330	340-375	380-410
Poission oranı	0,22-0,25	0,23-0,26	0,24-0,27
Sertlik, HV1,0	800-1000	1200-1600	1500-2000

4.1.1.3.2. Bor karbür (B₄C)

Elmaktan sonra bilinen en sert malzeme Bor Karbür(B₄C)'dür. Mekanik ve kimyasal korozyona karşı en iyi dirence sahiptirler. 2,5g/cm³ olarak çok az yoğunluğa sahiptirler. Bundan dolayı en iyi direnç / ağırlık oranına sahiptir. Gelişmiş ülkelerde özellikle Bor Karbür esas olarak personelin korunmasında, kargo uçaklarının ve helikopterlerin zırhlanmasında kullanılmaktadır. Bor karbür, balistik koruma alanında dünyadaki en büyük teknolojilerden biridir. 1858'de bulunan bu malzeme, dış görünüş olarak koyu siyah renge sahiptirler, Bor karbür Şekil4.2'de gösterilmektedir.



Şekil 4.2. Farklı Geometride Bor Karbür Seramik

Düşük ağırlık ile yüksek dayanım sağlayan bor karbürün mekanik özellikleri Tablo4.2'de verilmektedir [63].

Tablo 4.2. Mekanik Özellikler Bor Karbür için

Özellik	Birim	Değer
Yoğunluk	g/cm ³	2,52
Sertlik (100 g. Knopp)	Kgf/mm ²	2900-3580
Vickers Mikrosertlik	GPa	31,5
Kristal Yapı		Rombohedral
Kırılma Tokluğu	MPa. m ^{-1/2}	2,9-3,7
Ergime Sıcaklığı	°C	2450
Isıl Genleşme	°c'	5 X 10 ⁻⁶
Elektrik iletkenliği (25°C'de)	S	140
Elastisite Modülü	(GPa)	450-470
Kayma Modülü	GPa	186,5
Çekme Mukavemeti	MPa	155
Basma Dayanımı	MPa	2855

4.1.1.3.3. Silisyum karbür (SiC)

Tüm tehditlere karşı personelini korunması ve kara araçları ile hava araçlarının zırhlanmasında kullanılan malzemelerdir. Maliyet ve 67 ağırlık açısından Alümina ve Bor Karbür ile aynı seviyede malzemeler arasında yer almaktadırlar.

Dış görünüş olarak açık kahverengi bir toz şeklinde görünen Silisyum Karbür, 1891 yılında Acheson tarafından bulunmuştur. Termal iletkenliği düşük olup , yüksek termal şok dayanımı, düşük termal genleşmekatsayısına, yüksek sertliğe, düşük yoğunluğa, yüksek elastisite modülü, yüksek kırılma tokluğuna ve elmaştan daha büyük reaktif indeks değerlerine sahip bir malzemedir [64]. Şekil 4.3’de silisyum karbür altıgen seramik gösterilmekte olup, SiC’ ün tipik özellikleri Tablo 4.3’de verilmiştir [65].



Şekil 4.3. Altıgen Silisyum Karbür Seramik

Tablo 4.3. Silisyum Karbür Seramiğinin Özellikleri

Ortalama Yoğunluğu	3,1-3,3 g/cm ³
Su Emicilik Özelliği	%0
Vickers Sertliği	2000-2600MPa
Kırılma Tokluğu	2-5MPa.m ^{1/2}
Eğme Dayanımı	≥350MPa
E-Modülü	~380-450GPa

4.1.2. Polimer Zırhlar

1960'lardan günümüze kadar gelişen polimer malzeme teknolojisinin etkisi ile balistik biliminin üstünde göstermiştir, sonrasında balistik polimerler ortaya çıkmışlardır. Buna ilk örnekleri arasında kevlar verilebilmektedir. Kevlar; yüksek sertliği, mukavemeti ve düşük yoğunluğu ile öne çıkmaktadır. Zırh çeliğine kıyasla polimer malzemeler çok düşük ağırlıklarda ve çok daha düşük korunma seviyesi istenildiği durumlarda tercih edilmektedirler. Balistik kumaşlar özellikle vücut zırhlarında hafiflikten kaynaklı olarak tercih edilmektedirler. Ağırlığı azalma amacı ile metal ve seramik zırhlar ile beraber kompozit zırhlarda kullanılmaktadır.

4.1.3. Reaktif Zırhlar

Ana zırhın üzerine yapıştırılıp, kullanılan reaktifzırhlar, metal plakalar arasına sıkıştırılarak merminin yüzeye çarpmasından sonra merminin yönünün tersine bir reaksiyon gösterip, merminin asıl zırha olan etkisi azaltmak amaçlanmaktadır. İlk kez bu teknolojiyi 1982 yılında İsrail – Lübnan Savaşında kullanılıp, başarılı sonuçlar elde etmişlerdir. Reaktif zırh, Doğu Bloğu ülkeleri ordularının da sıklıkla kullanılmaktadırlar. Tuğla şeklindeana zırh üstüne yerleştirildiğinden dolayı isabet alan tuğlanın değiştirilmesi ile beraber tamir süresi de kısa olmaktadır. Bir diğer taraftan reaktif zırhın engelini aşabilme için tandem harpbaşlığı teknolojisini geliştirmiştir [30]. Tandem teknolojisi, bir savaş başlığına yerleştirilen patlayıcılar aracılığıyla reaktif zırhın harekete geçirilmesi ve daha etkili bir şekilde zırh delinmesi amacını taşır. Bu teknolojide, harp başlığının bir ucunda yer alan patlayıcı, reaktif zırhın çalışmasını tetiklerken, arkasında konumlandırılan daha güçlü patlayıcı ile hedefteki asıl zırh delinmeye çalışılır. Tandem teknolojisi, savaş başlıklarının etkisini artırmak için sıklıkla kullanılan bir yöntemdir [66].

4.1.4. Aktif Zırhlar

Zamanımızda kullanılmakta olan en yeni zırh teknolojileri arasında aktif zırh sayılmaktadır. Reaktif ve Pasif zırhların tam tersine tehdidin hedefe varmadan aktif zırhlar harekete geçmektedir. Aktif zırhlarda hardkill ve softkill olarak adlandırılan iki çeşit tipi bulunmaktadır.

Hardkill aktif zırh, tehdidin hedefe ulaşmadan önce yok etmektedirler. Softkill aktif zırh ise tehdidin yok edilmesi yerine başka bir tarafa yönlendirmeye çalışmaktadır. Aktif zırhların dezavantajları, çok pahalı sistemler olmalarıdır. Ancak üstüne monte edildikleri araca hafiflik sağladıkları için muharebe alanlarında çok kullanılmaktadır.

4.2. Zırh Sistemlerinde Kullanılan Analitik Modeller

18. yüzyılın sonlarına doğru çeliğin gemilerde kullanılması ile birlikte zırh sistemlerinde analitik modellenme için çalışmaları yapılmaya başlanılmıştır. Bu analitik modellerin bir çoğu momentumun ve enerjinin korunumu kanunu üzerinden geliştirilmişlerdir. 20. yüzyıl içerisinde geliştirilen formüllerdeyse kırılma mekaniği ile ilgili denklemlerde ele alınarak analitik metotlar geliştirilmiştir. Bu modeller aşağıda verilmiştir.

4.2.1. Florence Modeli

Florence, 1969'da yayınladığı makalesi ile seramik iletkenlerin analitik modellemesinde öncülük etmiştir. Florence, denklemlerini oluştururken merminin gövdesini kısa silindirik bir katı olarak kabul etmiştir.

4.2.2. Değiştirilmiş Florence Yaklaşımı

Florence modeli birçok çalışmada başarılı sonuçlar vermiş olmasına rağmen, zırh plakalarının sertlik ve akma dayanımı gibi bazı mekanik özelliklerini hesaba katmamaktadır. Bu nedenle Florence modeli üzerinde yapılan değişikliklerle birlikte malzeme sertliği gibi parametreler de dikkate alınmaktadır.

4.2.3. Ben-Dor, Dubinsky ve Elperin Yaklaşımı

Ben-Dor, Dubinsky ve Elperin, seramik malzemelerin mekanik özellikleri ve kırılma sırasındaki enerji kaybını Florence modeline ekleyerek bu modele birçok yenilik getirmiştir [67].

4.2.4. Pol Yaklaşımı

Pol, ince metalik zırh katmanları için bir model geliştirmiştir. Pol Modelinde, plakanın balistik sınırı hesaplanabilmektedir. Pol Modeli, enerjinin değişimini eşitleyerek, bir model oluşturmuştur [68].

4.2.5. Borvik Yaklaşımı

Borvik, 2008 yılında sunduğu modelde, mermideki aşınmayı göz ardı ederek ve silindirik kaviteasyon kuvvetlerini kullanarak kinetik enerji ve iş ilişkisi üzerinden metalik zırhlar için balistik limiti ile çıkış hız formülünü hesaplamıştır [69].

4.2.6. Woodward - Cimpoeu Yaklaşımı

Woodward ve Cimpoeu, ince metalik levhalar için balistik sınırdaki kullanılan denklem sunmuştur. Sünek delikli kumaşları da dikkate alarak bir balistik sınır ortaya çıkarmışlardır [70].

4.2.7. Thompson Yaklaşımı

Thompson alüminyum malzemeler için bir çıkış hızı hesaplayarak, modelinde Woodward-Cimpoeu modeline dayalı bir model oluşturmuştur [71].

4.2.8. Wijk Yaklaşımı

Wijk, enerjisinin korunumu yasasını kullanarak metal zırhlar için analitik bir model geliştirmiştir [72].

4.2.9. Lambert - Jones Yaklaşımı

Recht-Ipson modelinin değiştirilmesiyle ortaya çıkan Lambert-Jones Modeli, mermi zırhlı delip, geçtikten sonra çıkan verilerde kullanılan en genel formüllerden biridir [73].

5. MERMİ

Mermi, genellikle bir silah veya topun namlusundan fırlatılarak hedefe yönlendirilen, mermi kovanı, barut, başlık (çekirdek), bazen de fûnye ve patlayıcı madde gibi bileşenleri içeren bir mühimmat parçasıdır.

Mermiler, balistik özelliklerine, amaçlarına ve kullanıldıkları silahlara göre çeşitli tiplerde olabilirler. Örneğin, av mermileri, savunma mermileri, askeri mermiler, savaş mermileri, keskin nişancı mermileri, tüfek mermileri, tabanca mermileri gibi farklı amaçlara yönelik mermi türleri mevcuttur.

Teknolojinin ilerlemesiyle birlikte, hız, yapısal özellikleri ve şekil gibi birçok farklı özellikleri barındıran mermiler günümüzde yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca farklı tasarımlara sahip silahlar ve tüfekler de üretilerek, farklı amaçları ve tahrip etme özellikleri için kullanılmaktadır [74]

Bir mermi, silahın namlusundan çıktığında genellikle yüksek hızlarda ilerler. Bu hız, merminin kinetik enerjisi olarak adlandırılır ve merminin başlığına bağlı olarak hedefi delmek veya hasar vermek için kullanılır. Merminin kinetik enerjisi, merminin kütlesi ve hızına bağlıdır.

Mermilerin temas ettiği hedef üzerindeki etkisi, mermi yapısındaki birçok faktöre bağlıdır. Mermi uç şekli, hızı, kaplama özellikleri ve çekirdek malzemesi, hedefe nüfuziyetini ve deformasyonunu belirler. Bu yapısal özelliklerin her biri, mermi atışının sonucunu önemli ölçüde etkiler [75].

Mermi malzemeleri genellikle sert metal alaşımlarıdır ve çoğunlukla bakır, tungsten, kurşun, çelik veya titanyum gibi malzemeler kullanılır. Bazı özel amaçlı mermilerde, çekirdek malzemeleri özellikle seçilerek özellikli bir performans sağlanabilir.

Mermiler, tarihsel olarak savunma, avcılık ve askeri amaçlar için kullanılmış olsa da günümüzde birçok farklı amaç için kullanılmaktadır. Bunlar arasında savunma, avcılık, askeri, polis, sportif ve hobi amaçları gibi çeşitli alanlar yer almaktadır.

6. MATERYALLER VE YÖNTEMLER

6.1. Materyaller

Bu çalışmada Ansys Design Modeler ve Explicit Dynamics paket programları kullanılmıştır. Ansys programı; mühendislik uygulamalarını ve bilimsel deneyleri sayısal olarak modelleyen bir yazılımdır. Fiziksel problemleri çözmek amacıyla bir dizi bilgisayar tabanlı sayısal yöntem kullanmaktadır. Balistik analizler için katmanlı ve arası boşluklu malzemeler tasarlanmıştır.

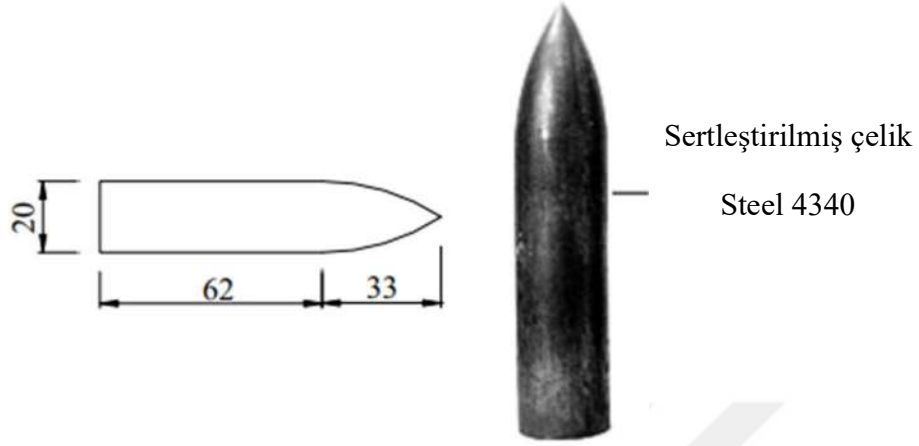
6.2. Yöntemler

Projede gerekli 3 boyutlu tasarım çizim programları ve sonuçları değerlendirmek amacıyla simülasyon yapan analiz programları kullanılmıştır. Tasarım için ANSYS paket programının Design Modeler modülü kullanılmıştır. Analiz için ANSYS alt modülü Explicit Dynamics kullanılmıştır. Bu modül, yapıların ani olarak gelişen kuvvetlere ya da zamana bağlı hızlı olarak değişen kuvvetlere karşı davranışını incelemek amacıyla kullanılır. Ani gelişen kuvvetlerin oluşumu hızlı olduğundan genellikle bir saniyenin altındaki durumlar incelenir. Mermi atışında hız önemli olduğu için bu sekmenin kullanılması analizde doğru sonuçlar alınmasına yardım olacaktır.

Bu çalışmada ilk olarak mevcut yapılmış bir deneysel çalışma ele alınıp ve burada kullanılan mermi ve zırh modelleri ANSYS paket programının Design Modeler modülü ile tasarlanmıştır. Model oluşturulduktan sonra ANSYS Explicit Dynamics modülü ile analize başlamadan önce tasarım ağ yapılarına bölüp (mesh işlemi), yine referans çalışmadaki fiziksel koşullar modele sınır ve başlangıç şartı olarak uygulanmıştır (mermi hızı, dönmesi vs.). Gerekli analiz ayarları yapıldıktan sonra modelin çözümü yaptırılmıştır. Çıkan sonuçlar deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlar birbiri ile tutarlı hale gelip model için uygun mesh yapısı belirleninceye kadar mesh analizi yapılmaya devam edilmiştir. Mesh analizi yapıp, deneysel sonuçlar ile yapılan analiz sonuçları tutarlı hale gelince aynı mermeğe karşılık kendi tasarladığımız boşluklu zırhın balistik testleri yapılmıştır.

7. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Araştırmada kullanılan mermi ve özellikleri aşağıdaki gibidir.



Şekil 7.1. Ogive Uçlu Mermi [76]

Şekil 7.1, 3.0 çap-yarıçaplı-baş (CRH=3.0), ogive-uçlu mermisinin boyutlarını göstermektedir. Bu mermi, gövde uzunluğu $L=62$ mm, burun uzunluğu $l=33$ mm ve çapı $2a=20$ mm'dir. Çelik mermi, yoğunluğu $\rho_p=7850$ kg/m³, kütlesi $m=0.197$ kg ve sertlik 53R_c olan S4340 malzemesidir.

S4340 malzemesinin teknik özellikleri aşağıdaki gibidir.

- Yoğunluk: 7.85 g/cm³
- Erime noktası: 1416-1455°C (2581-2651°F)
- Elastikiyet modülü: 190-210 GPa (27557-30458 ksi)
- Termal genleşme katsayısı: 11.6-12.9 $\mu\text{m}/\text{m}^\circ\text{C}$
- Elektriksel direnç: 1.25-1.5 $\mu\Omega\text{m}$
- İç direnç: 0.135-0.15 $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$
- Termal iletkenlik: 42-48 W/mK
- Tokluk: 54-60 J
- Akma dayanımı: 930-950 MPa (134877-137754 psi)
- Kırılma dayanımı: 1520-1550 MPa (220331-224774 psi)
- Uzama: 13-15%



Şekil 7.2. AA5083-H116 Zırh Malzemesi

AA5083-H116, alüminyum alaşımıdır. Alüminyum alaşımları, çeşitli endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılırlar. AA5083-H116 alaşımı, yoğunluk, mukavemet, sertlik ve dayanıklılık gibi özelliklerle karakterizedir. H116, alaşımın ısıtılma işlemi görmüş olduğunu ve donanımına hazır olduğunu gösterir. Bu alaşım genellikle gemi yapımı, denizcilik endüstrisi, havacılık, araç yapımı, yüksek basınçlı tanklar, kimya endüstrisi ve diğer birçok endüstriyel uygulama için kullanılır.

AA5083-H116 Teknik özellikleri aşağıdaki gibidir.

- Yoğunluk: 2,66 g/cm³
- Erime noktası: 570-640°C (1058-1184°F)
- Elastikiyet modülü: 70 GPa (10,153 ksi)
- Termal genleşme katsayısı: 23,8 µm/m°C
- Termal iletkenlik: 121 W/mK
- Akma dayanımı: 240 MPa (34809.1 psi)
- Kopma dayanımı: 305 MPa (44236.5 psi)
- Uzama: 12%

Mermi hızına göre dönüş rad/s cinsinden aşağıdaki formülle bulunmaktadır.

$$MV = Değer;$$

$$MVFPS = 3.2808398950131 * MV;$$

$$TWRInch = 12;$$

$$BulletRPM = MVFPS \left(\frac{12}{TWRInch} \right) 60$$

$$BRadSn = N[BulletRPM * \frac{2\pi}{60}]$$

MV: Merminin Hızı (m/s)

MVFPS: Mermi hızı birim değişimi (feet/s)

TWRInch: Dönme inch

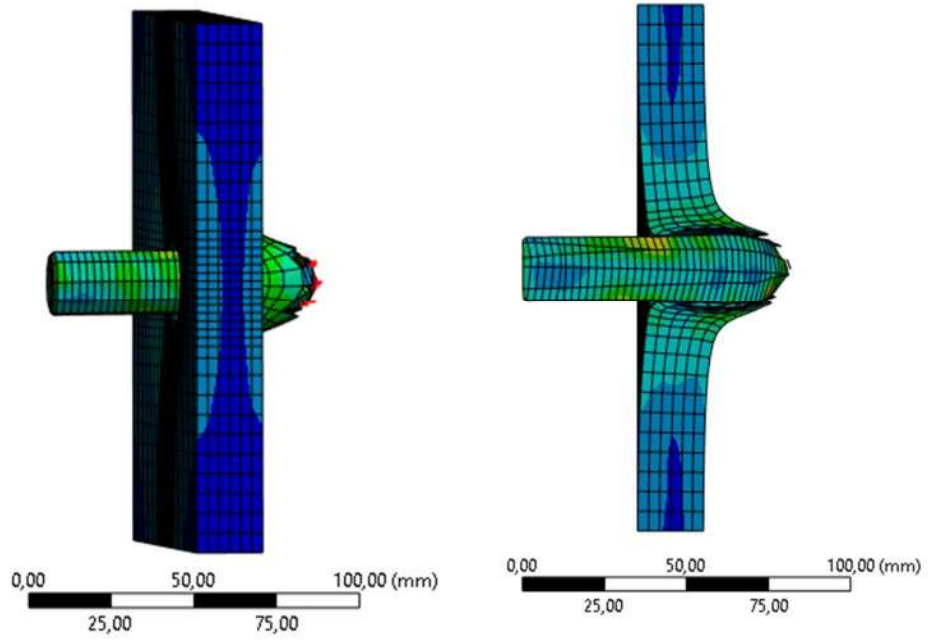
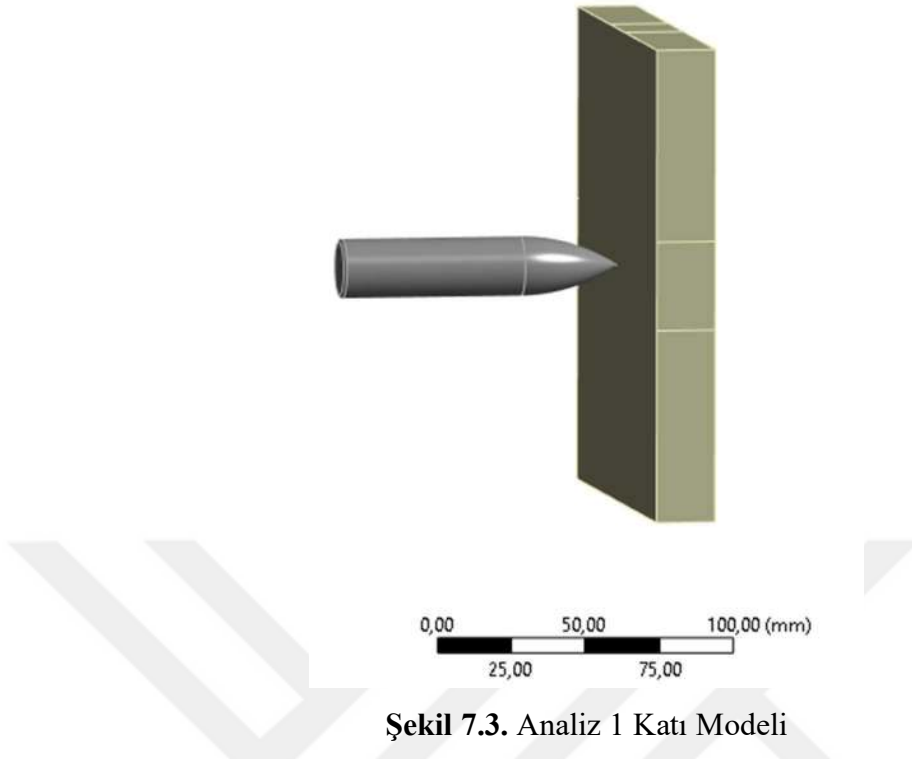
BulletRPM: Mermi dönüşü (RPM)

BRadSn: Mermi Dönüşü (rad/s)

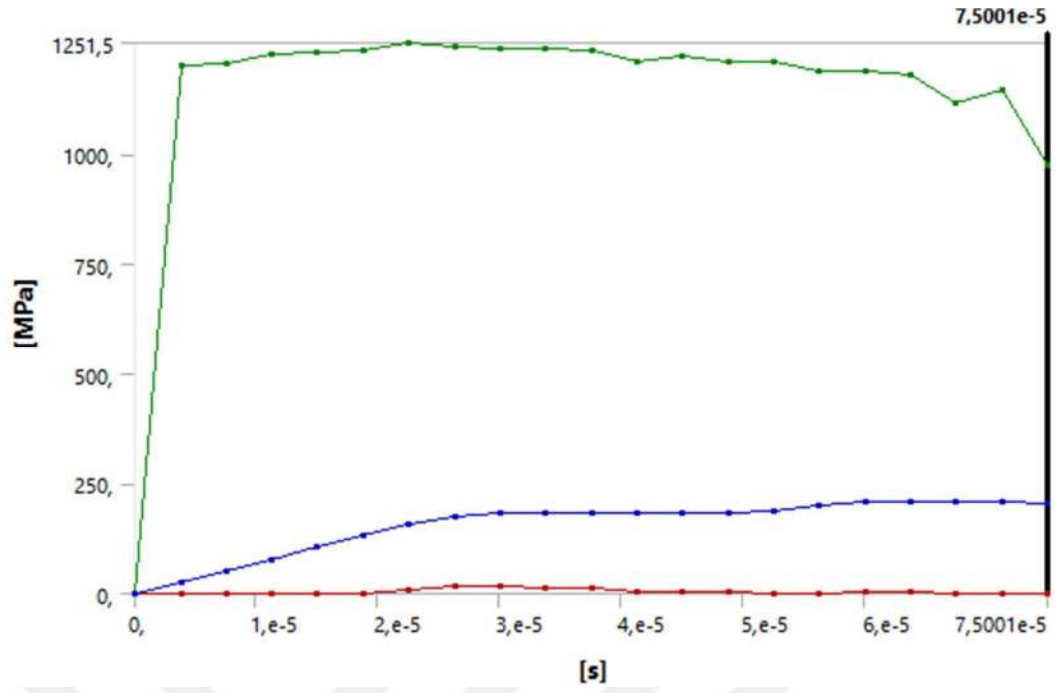
7.1. Analiz Sonuçları

Analiz 1

Bir zırhın performansını test etmek için, ogive uçlu bir mermi kullanılarak 20mm kalınlığında Al5083-H116 malzemeden yapılmış zırh tasarlandı. Test, 22°C ortam sıcaklığında gerçekleşmiş olup, mermi 854,1 m/s hızla ateşlendi ve 17606 rad/s dönüşle zırha çarptı. Ancak, zırh mermiyi durduramadı ve merminin zırhı terk etme hızı 705,2 m/s olarak ölçüldü. Bu sonuçlar, Borvik ve arkadaşlarının 2010 yılında gerçekleştirdiği deneyde ölçülen 700,4 m/s hızla %0,8'lik bir hata oranıyla uyumlu olduğu görülmüştür.

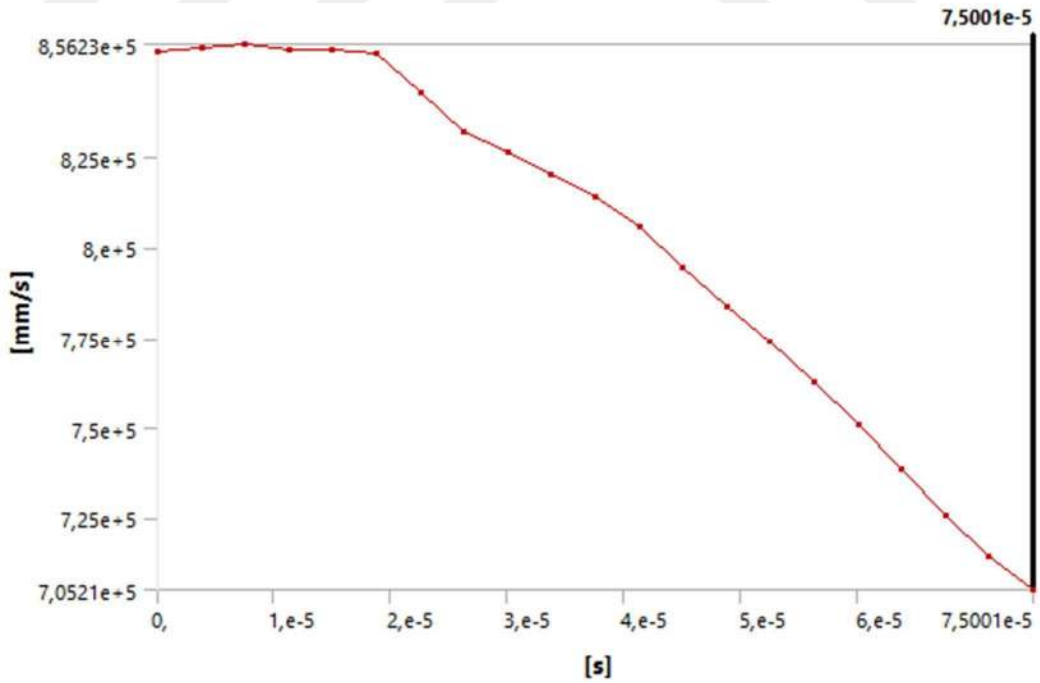


Şekil 7.4. Analiz 1 Eşdeğer Gerilme Dağılımları



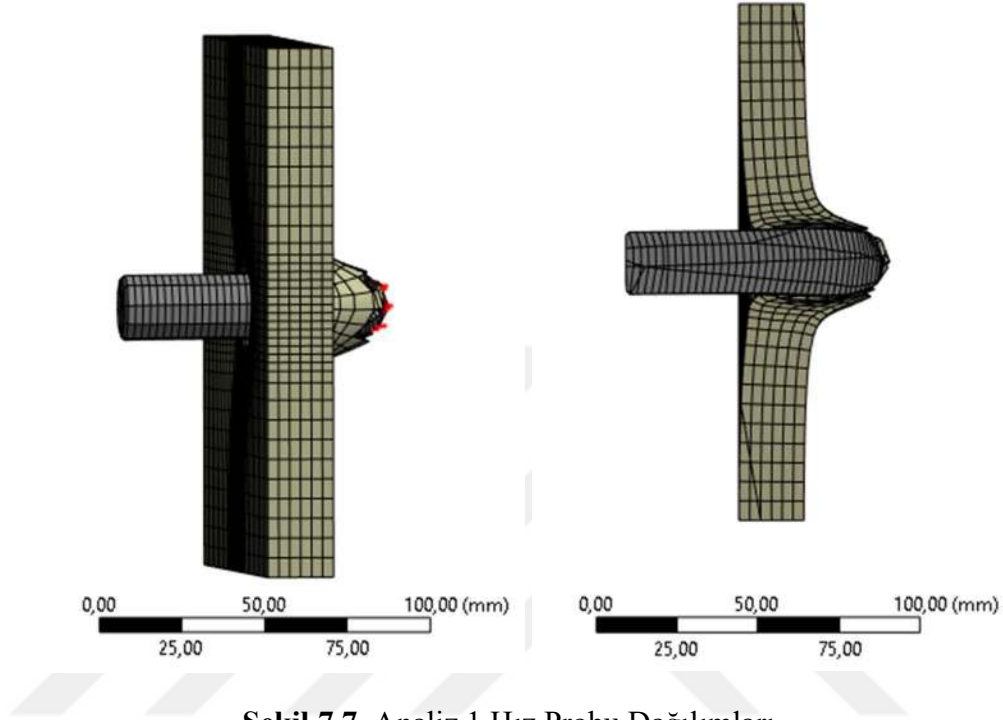
Şekil 7.5. Analiz 1 Eşdeğer Gerilme Grafiği

Analiz sonucu çıkan plastik şekil değişimi değerleri ve renklendirmeleri ile birlikte yukarıdaki Şekil 7.5'te verilmiştir.



Şekil 7.6. Analiz 1 Hız Probu Grafiği

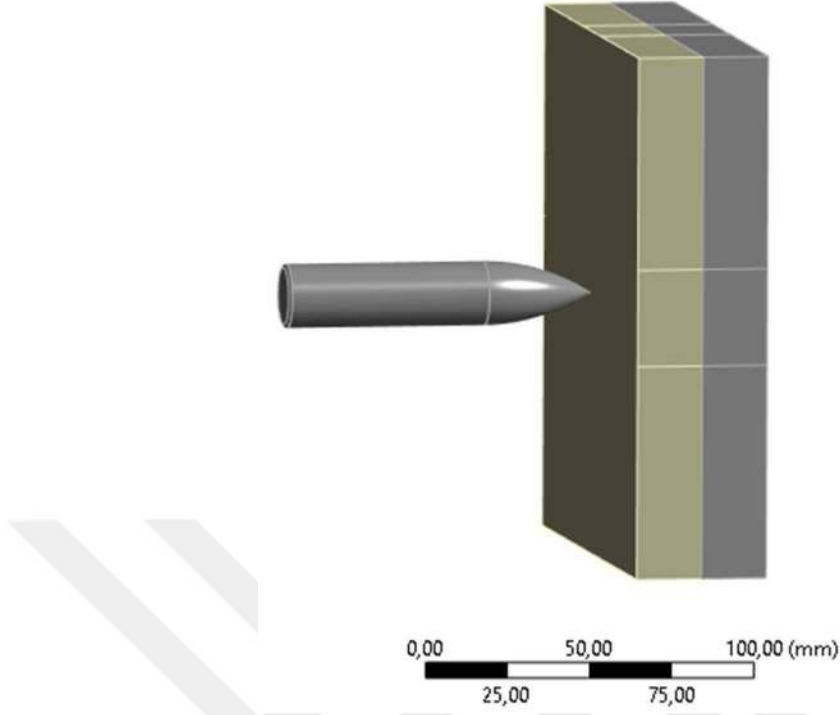
Hız değişim grafiği Şekil 7.6’de verilmiştir. Aşağıda verilen Şekil 7.7’den de anlaşılacağı gibi mermi 854,1 m/s hızında 17606 rad/s dönme ile 20mm kalınlığındaki zırhı delerek geçmiştir.



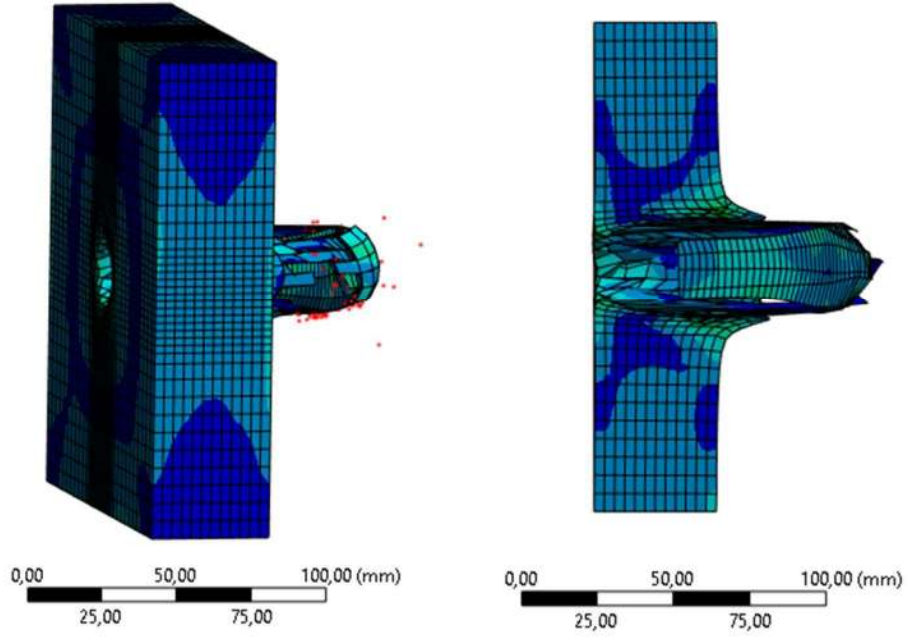
Şekil 7.7. Analiz 1 Hız Probu Dağılımları

Analiz 2

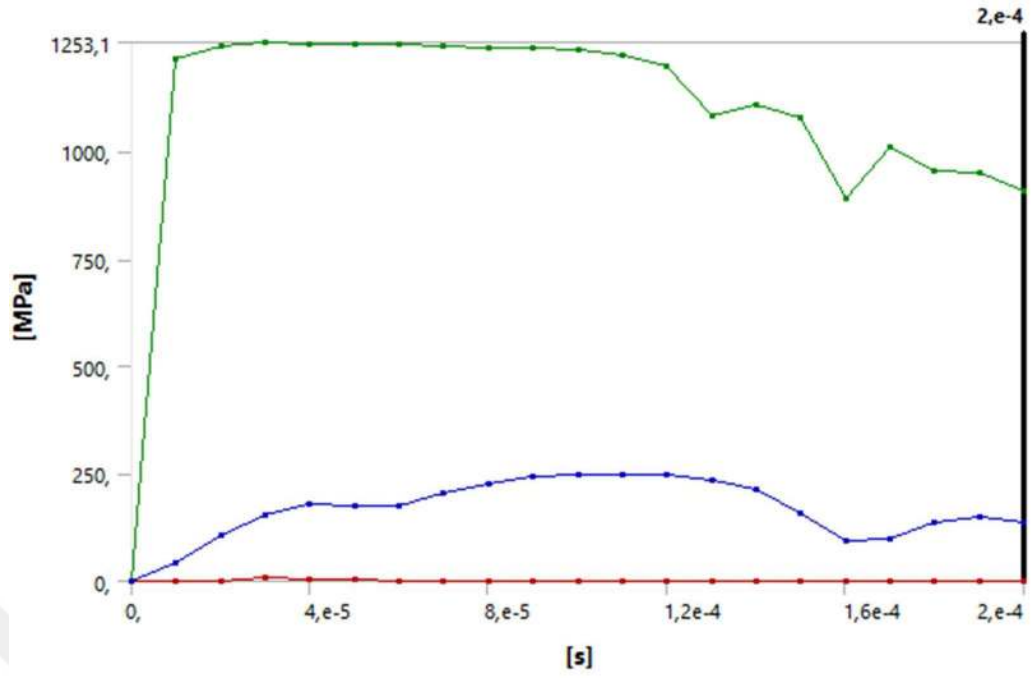
Aralarında boşluk olmayan iki adet zırhın performansını test etmek için, ogive uçlu bir mermi kullanılarak 20mm (20+20mm) kalınlığında Al5083-H116 malzemeden yapılmış zırh tasarlandı. Test, 22°C ortam sıcaklığında gerçekleşmiş olup, mermi 867,6 m/s hızla ateşlendi ve 17885 rad/s dönüşle zırha çarptı. Ancak, zırh mermiyi durduramadı ve merminin zırhı terk etme hızı 415 m/s olarak ölçüldü. Bu sonuçlar, Borvik ve arkadaşlarının 2010 yılında gerçekleştirdiğı deneyde ölçülen 402,4 m/s hızla %3,1’lik bir hata oranıyla uyumlu olduğu görülmüştür.



Şekil 7.8. Analiz 2 Katı Modeli

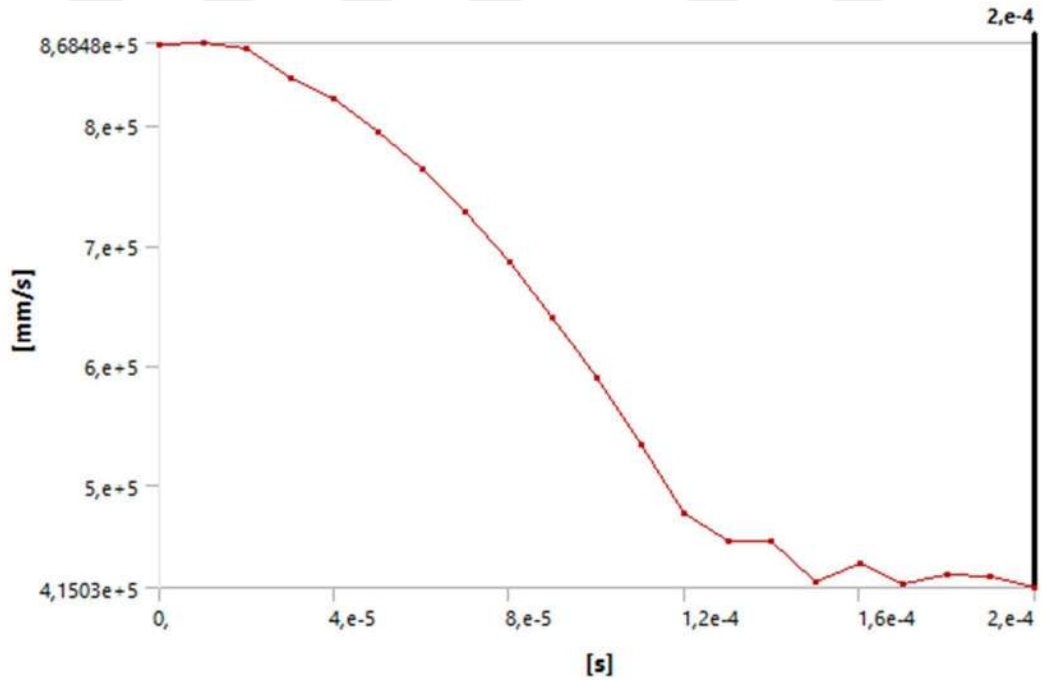


Şekil 7.9. Analiz 2 Eşdeğer Gerilme Dağılımları



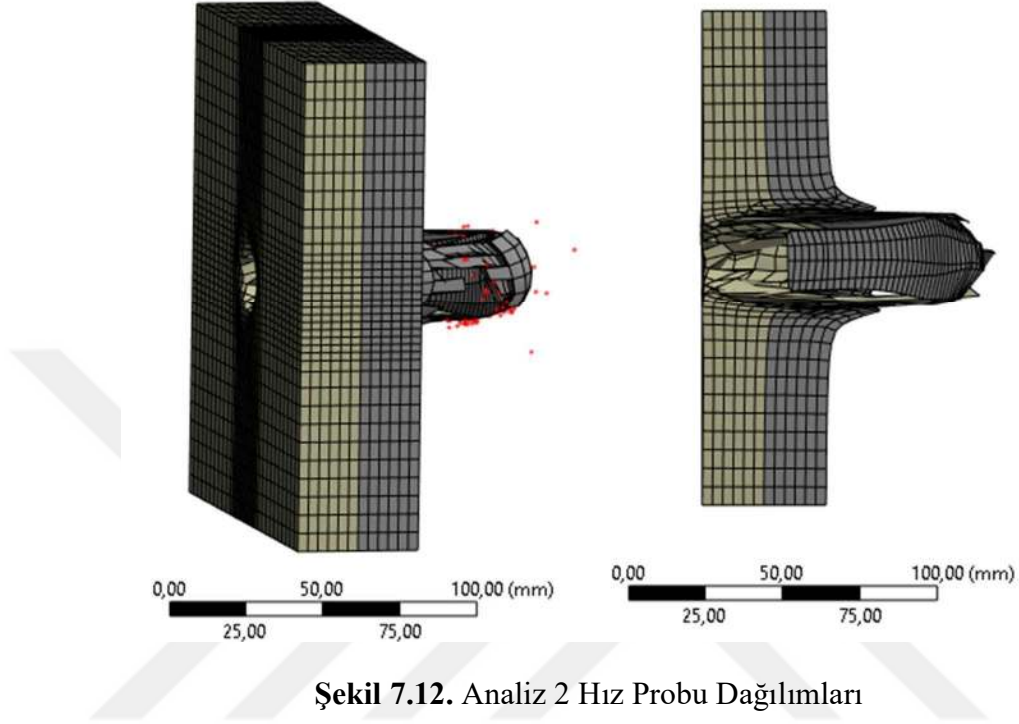
Şekil 7.10. Analiz 2 Eşdeğer Gerilme Grafiği

Analiz sonucu çıkan plastik şekil değişimi değerleri ve renklendirmeleri ile birlikte yukarıdaki Şekil 7.10’da verilmiştir.



Şekil 7.11. Analiz 2 Hız Probu Grafiği

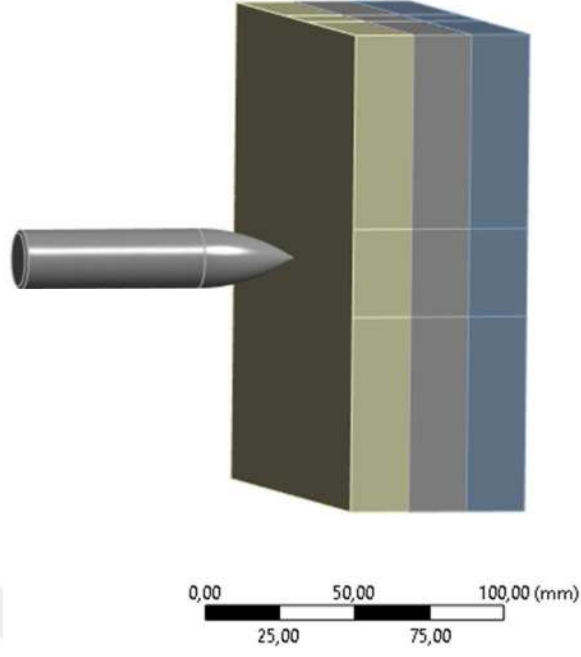
Hız değişim grafiği Şekil 7.11’da verilmiştir. Aşağıda verilen Şekil 7.12’den da anlaşılacağı gibi mermi 867,6 m/s hızında 17885 rad/s dönme ile 20mm kalınlığındaki boşluksuz iki adet zırhı delerek geçmiştir.



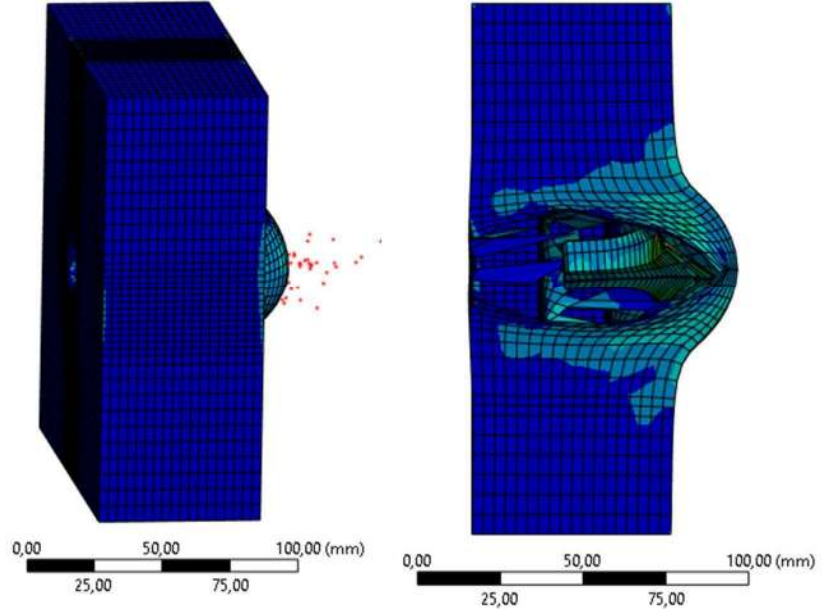
Şekil 7.12. Analiz 2 Hız Probu Dağılımları

Analiz 3

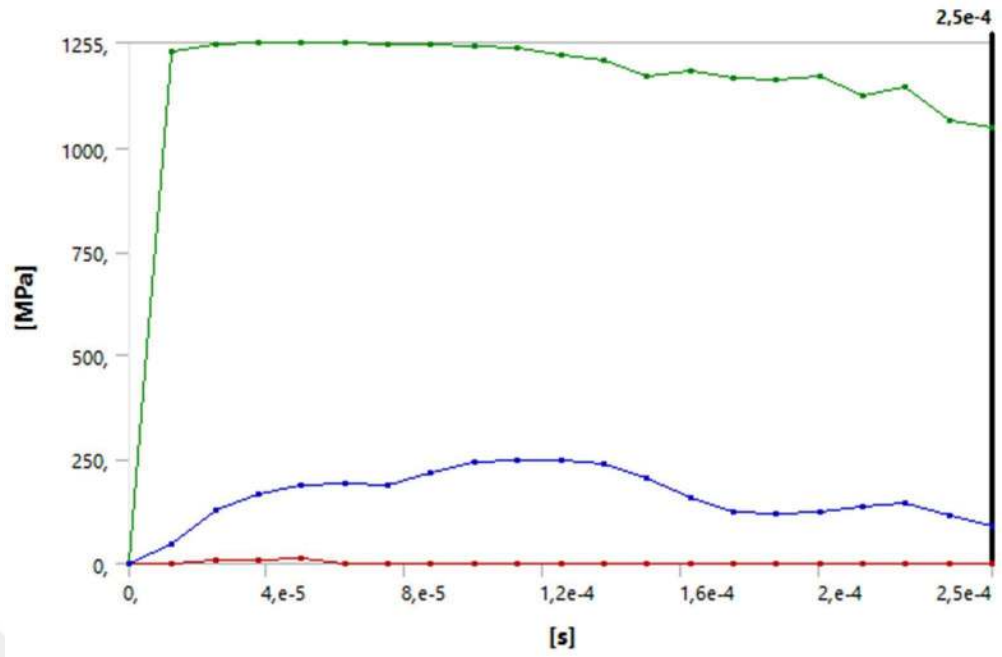
Aralarında boşluk olmayan üç adet zırhın performansını test etmek için, ogive uçlu bir mermi kullanılarak 20mm (20+20+20mm) kalınlığında Al5083-H116 malzemeden yapılmış zırh tasarlandı. Test, 22°C ortam sıcaklığında gerçekleşmiş olup, mermi 1007,6 m/s hızla ateşlendi ve 20770 rad/s dönüşle zırha çarptı. Zırh mermiyi durdurdu. Bu sonuçlar, Borvik ve arkadaşlarının 2010 yılında gerçekleştirdiği deneyde ölçülen 0 m/s hızla %0’lık bir hata oranıyla uyumlu olduğu görülmüştür.



Şekil 7.13. Analiz 3 Katı Modeli

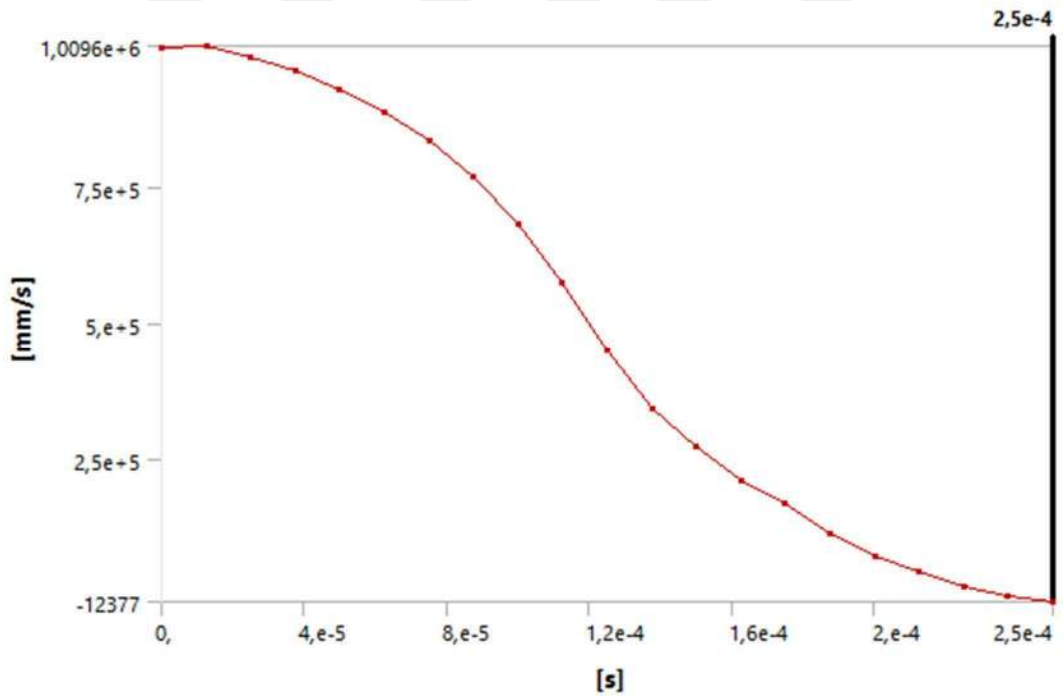


Şekil 7.14. Analiz 3 Eşdeğer Gerilme Dağılımları



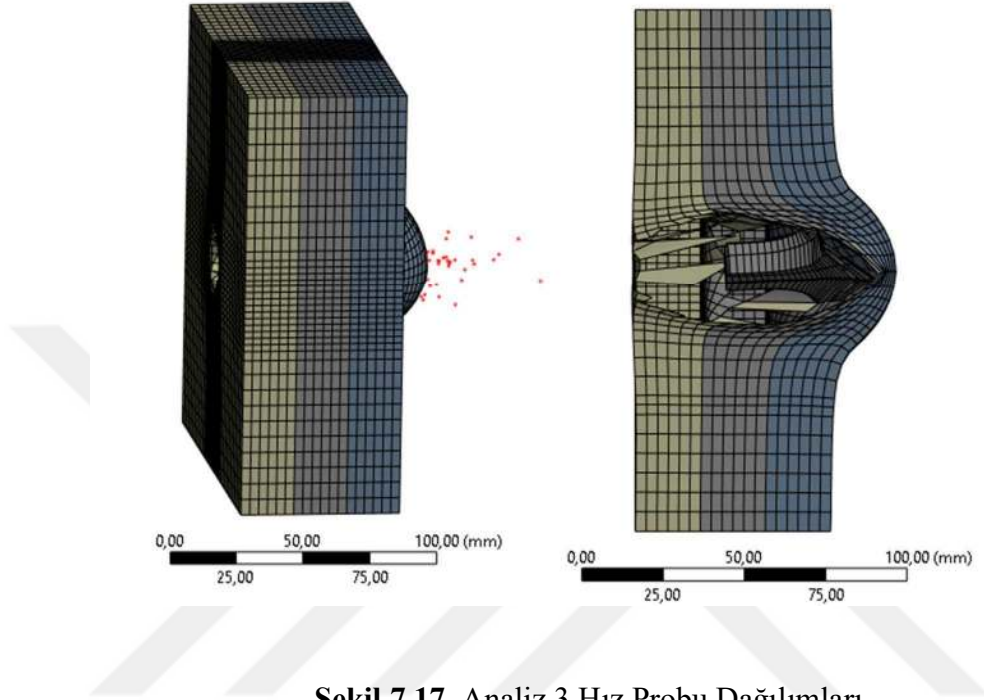
Şekil 7.15. Analiz 3 Eşdeğer Gerilme Grafiği

Analiz sonucu çıkan plastik şekil değişimi değerleri ve renklendirmeleri ile birlikte yukarıdaki Şekil 7.16’de verilmiştir.



Şekil 7.16. Analiz 3 Hız Probu Grafiği

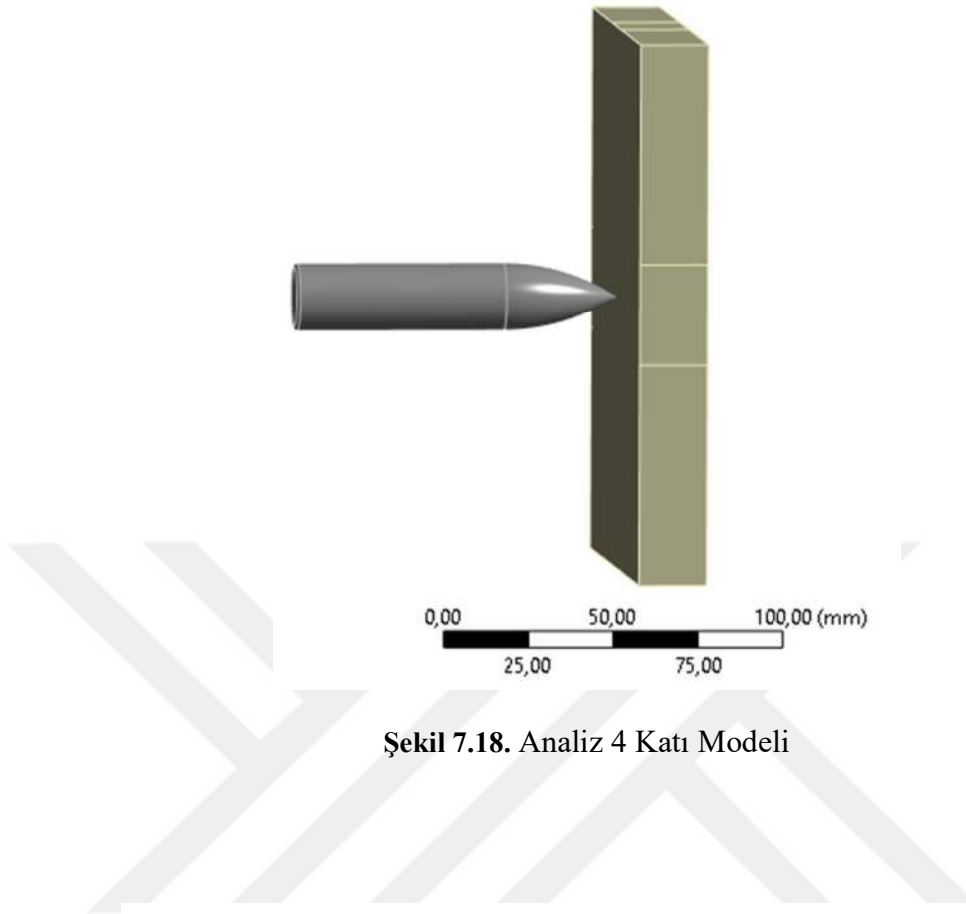
Hız değişim grafiği şekil 7.16’de verilmiştir. Aşağıda verilen şekil 7.17’den de anlaşılacağı gibi mermi 1007,6 m/s hızında 20770 rad/s dönme ile 20mm kalınlığındaki boşluksuz  adet zırhı delememiştir.



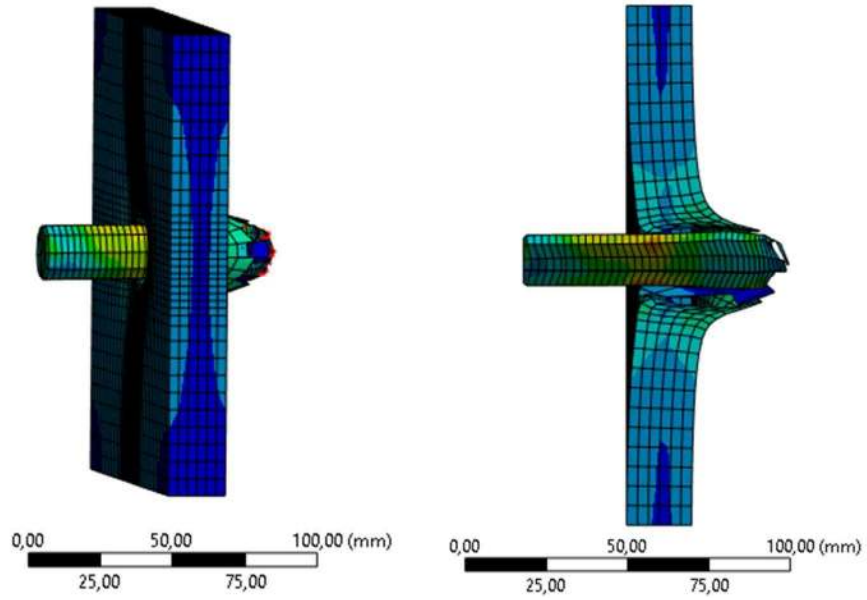
şekil 7.17. Analiz 3 Hız Probu Dağılımları

Analiz 4

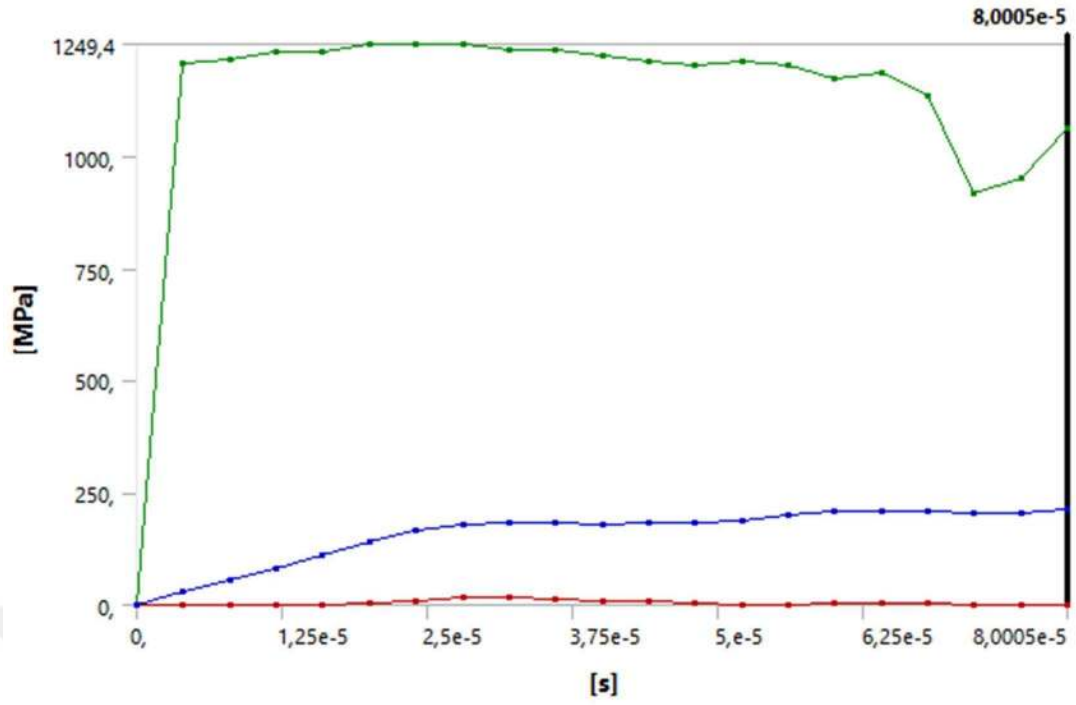
Bir zırhın performansını test etmek için, ogive uçlu bir mermi kullanılarak 20mm kalınlığında Al5083-H116 malzemeden yapılmış zırh tasarlandı. Test, 22°C ortam sıcaklığında gerekleşmiş olup, mermi 850 m/s hızla ateşlendi ve 17522 rad/s dnüşle zırha arptı. Ancak, zırh mermiyi durduramadı ve merminin zırhı terk etme hızı 700,7 m/s olarak ölçüldü.



Şekil 7.18. Analiz 4 Katı Modeli

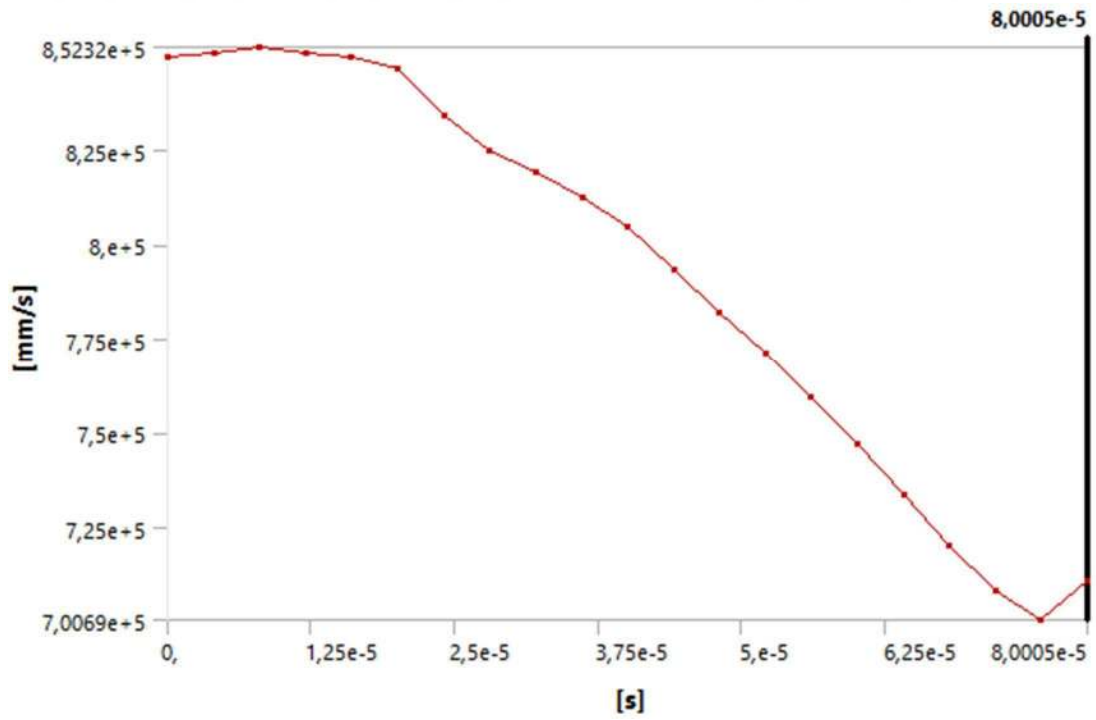


Şekil 7.19. Analiz 4 Eşdeğer Gerilme Dağılımları



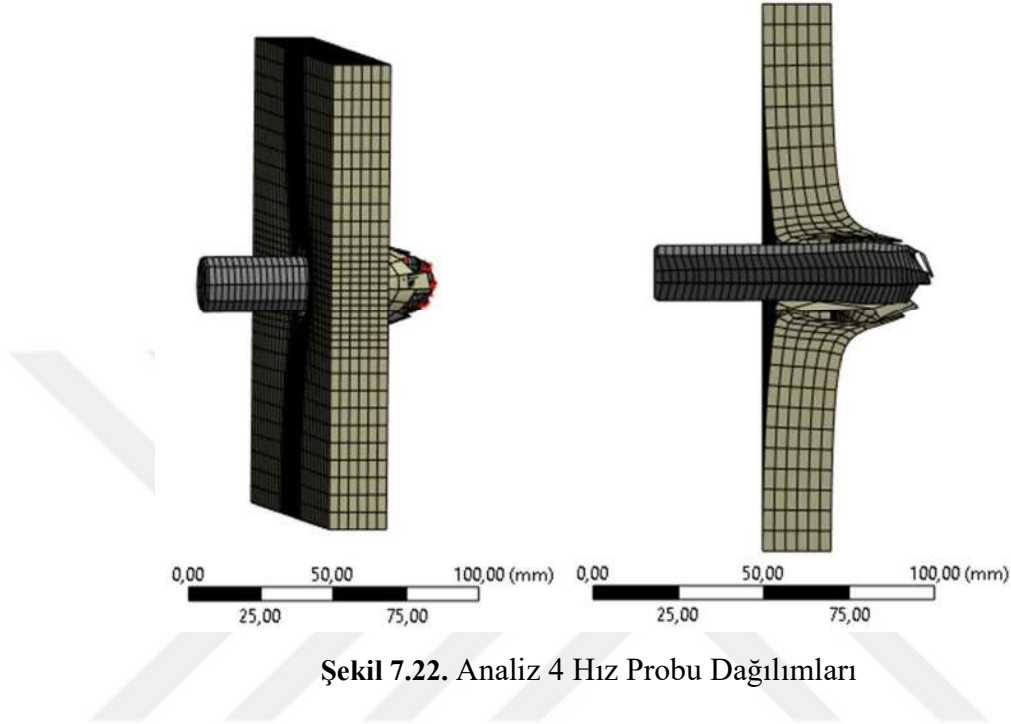
Şekil 7.20. Analiz 4 Eşdeğer Gerilme Grafiği

Analiz sonucu çıkan plastik şekil değişimi değerleri ve renklendirmeleri ile birlikte yukarıdaki Şekil 7.20’da verilmiştir.



Şekil 7.21. Analiz 4 Hız Probu Grafiği

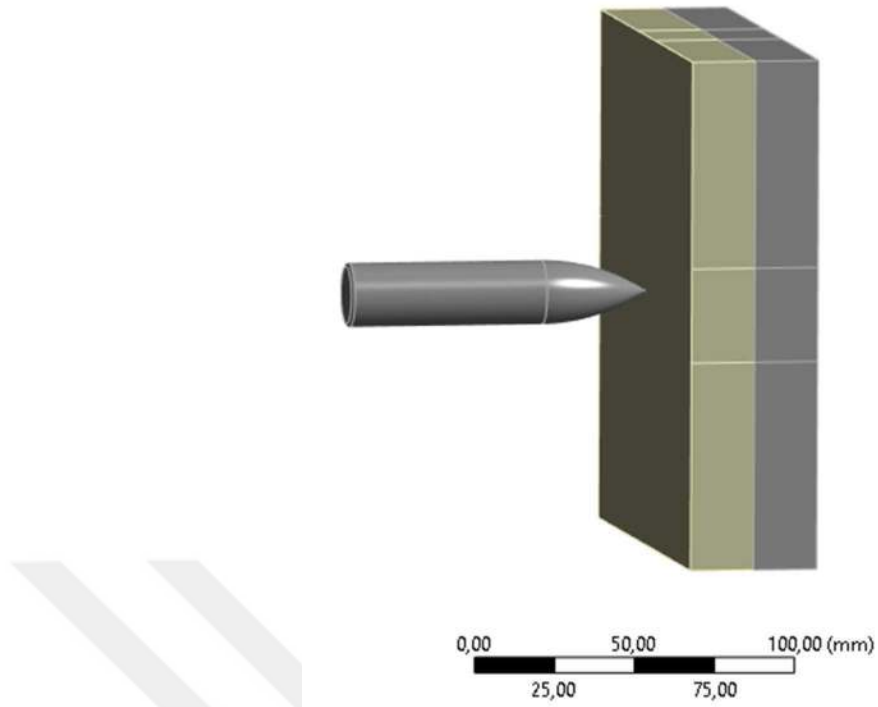
Hız değişim grafiği şekil 7.21’de verilmiştir. Aşağıda verilen şekil 7.22’den da anlaşılacağı gibi mermi 850 m/s hızında 17522 rad/s dönme ile 20mm kalınlığındaki bir adet zırhı delerek gemiştir.



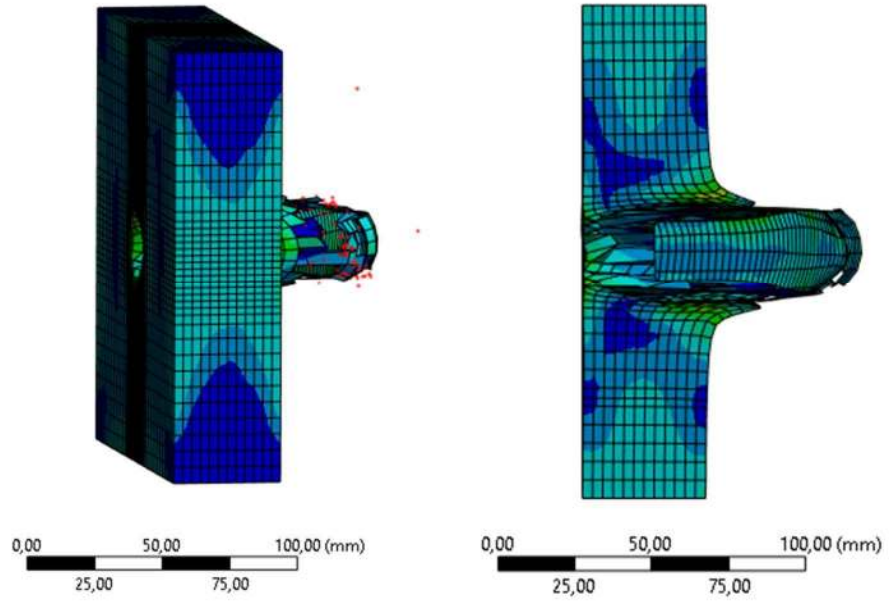
şekil 7.22. Analiz 4 Hız Probu Dağılımları

Analiz 5

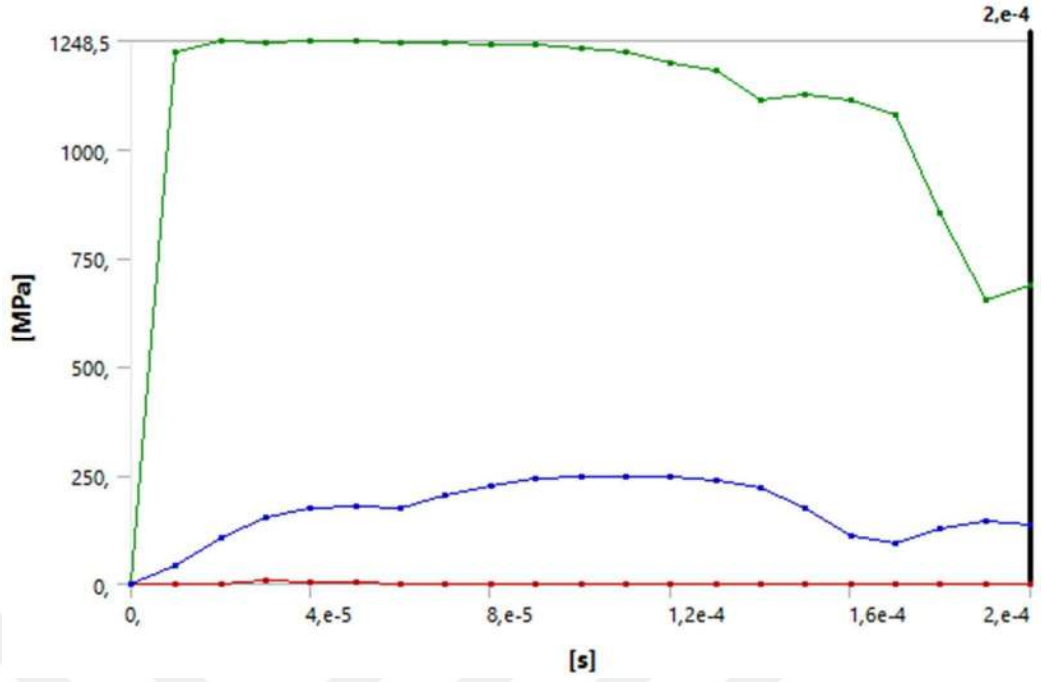
Aralarında boşluk olmayan iki adet zırhın performansını test etmek için, ogive uçlu bir mermi kullanılarak 20mm (20+20mm) kalınlığında Al5083-H116 malzemeden yapılmış zırh tasarlandı. Test, 22°C ortam sıcaklığında gerekleşmiş olup, mermi 850 m/s hızla ateşlendi ve 17522 rad/s dnüşle zırha arptı. Ancak, zırh mermiyi durduramadı ve merminin zırhı terk etme hızı 380,5 m/s olarak ölçüldü.



Şekil 7.23. Analiz 5 Katı Modeli

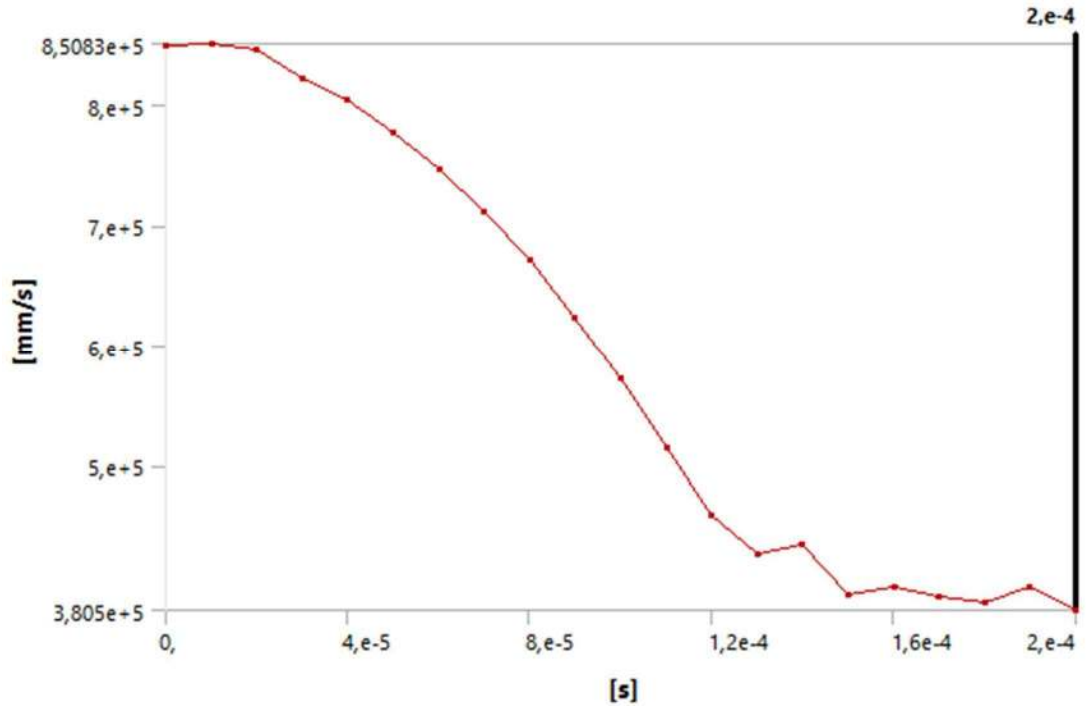


Şekil 7.24. Analiz 5 Eşdeğer Gerilme Dağılımları



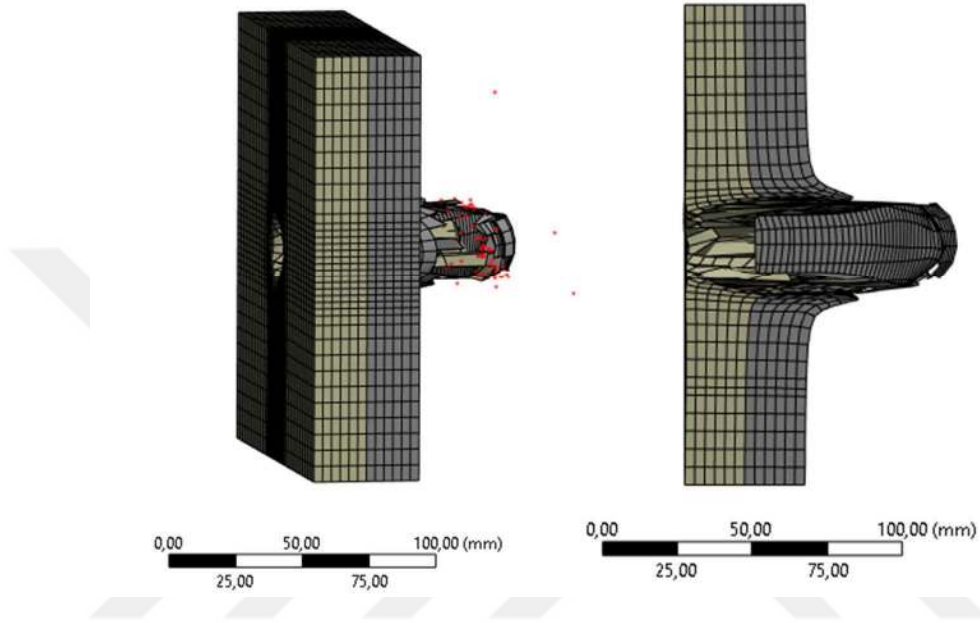
Şekil 7.25. Analiz 5 Eşdeğer Gerilme Grafiği

Analiz sonucu çıkan plastik şekil değişimi değerleri ve renklendirmeleri ile birlikte yukarıdaki Şekil 7.25'te verilmiştir.



Şekil 7.26. Analiz 5 Hız Probu Grafiği

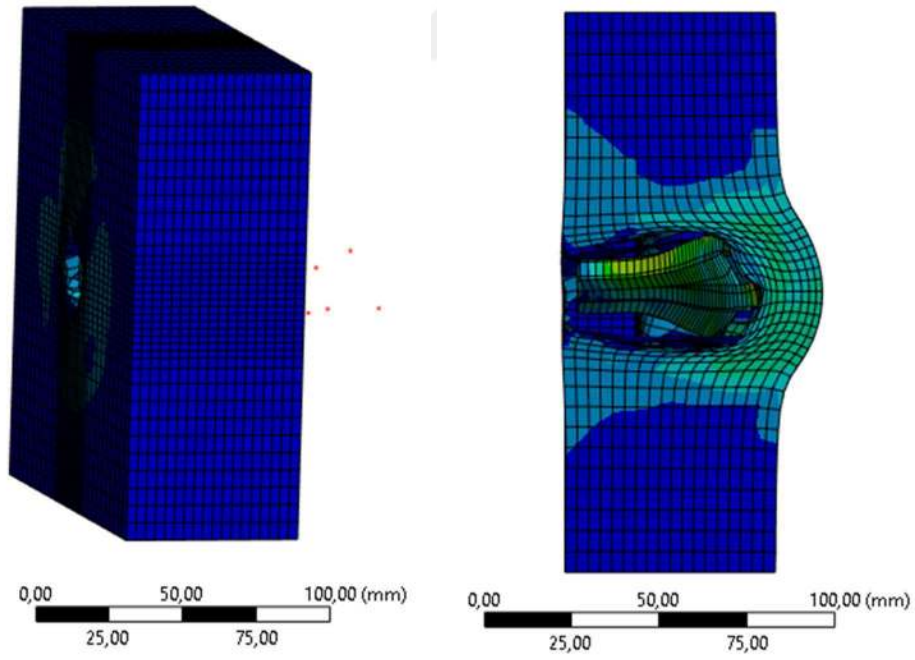
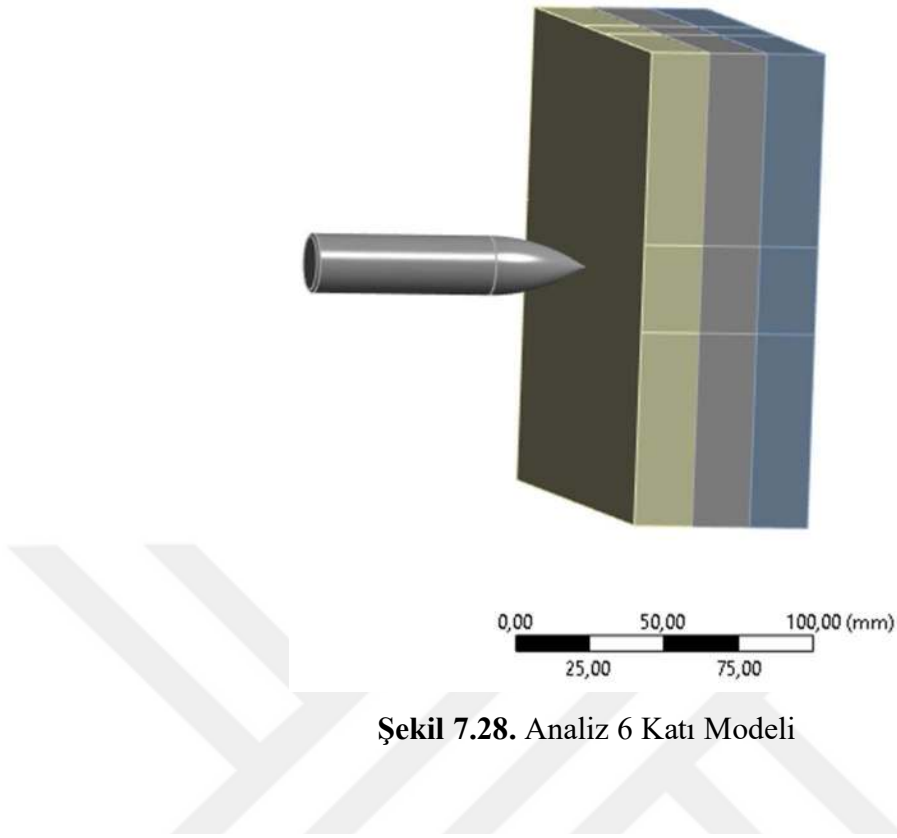
Hız değişim grafiği şekil 7.26’de verilmiştir. Aşağıda verilen şekil 7.27’den de anlaşılacağı gibi mermi 850 m/s hızında 17522 rad/s dönme ile 20mm kalınlığındaki boşluksuz iki adet zırhı delerek gemiştir.



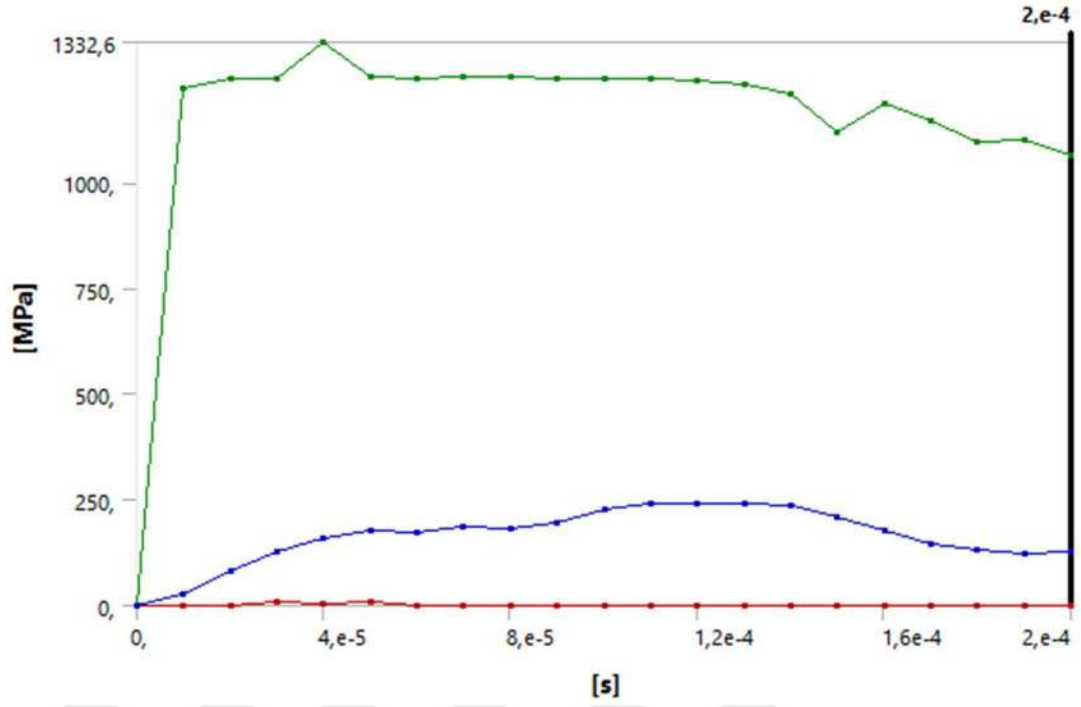
şekil 7.27. Analiz 5 Hız Probu Dağılımları

Analiz 6

Aralarında boşluk olmayan  adet zırhın performansını test etmek için, ogive uçlu bir mermi kullanılarak 20mm (20+20+20mm) kalınlığında Al5083-H116 malzemeden yapılmış zırh tasarlandı. Test, 22°C ortam sıcaklığında gerekleşmiş olup, mermi 850 m/s hızla ateşlendi ve 17522 rad/s dnüşle zırha arptı. Zırhın mermiyi durdurduğu görüldü.

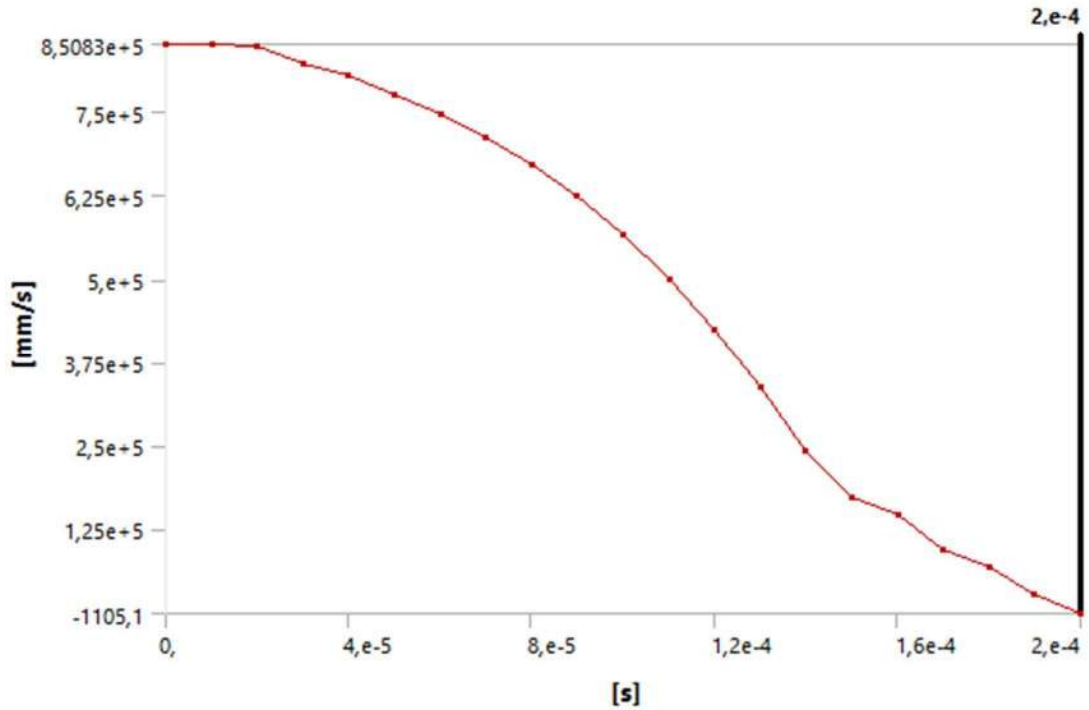


Şekil 7.29. Analiz 6 Eşdeğer Gerilme Dağılımları



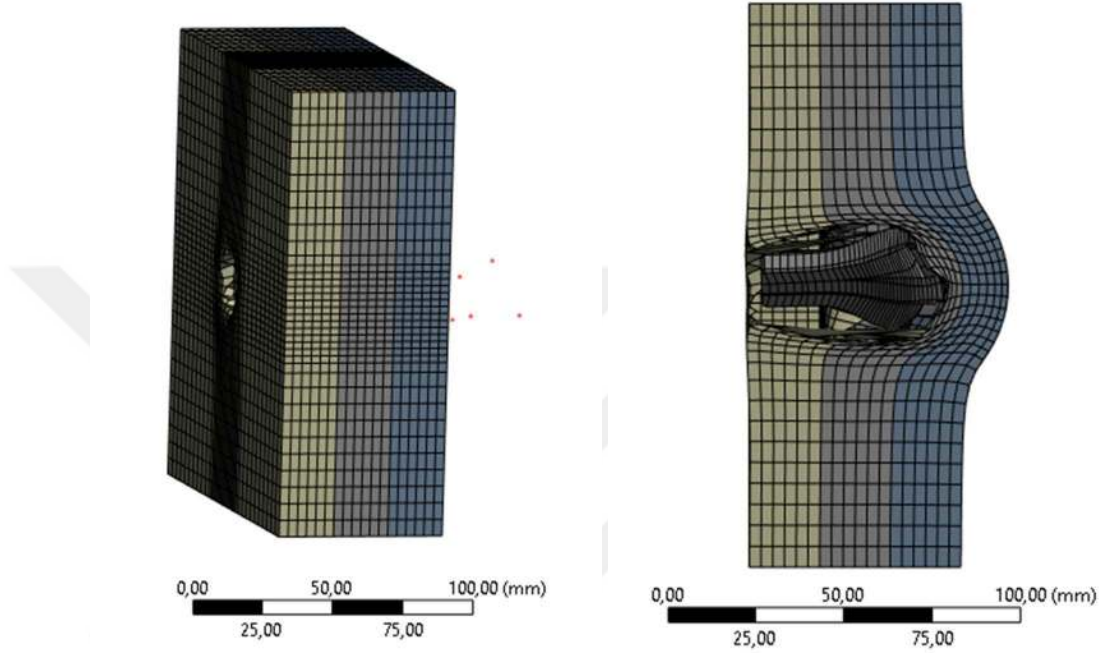
Şekil 7.30. Analiz 6 Eşdeğer Gerilme Grafiği

Analiz sonucu çıkan plastik şekil değişimi değerleri ve renklendirmeleri ile birlikte yukarıdaki Şekil 7.30’de verilmiştir.



Şekil 7.31. Analiz 6 Hız Probu Grafiği

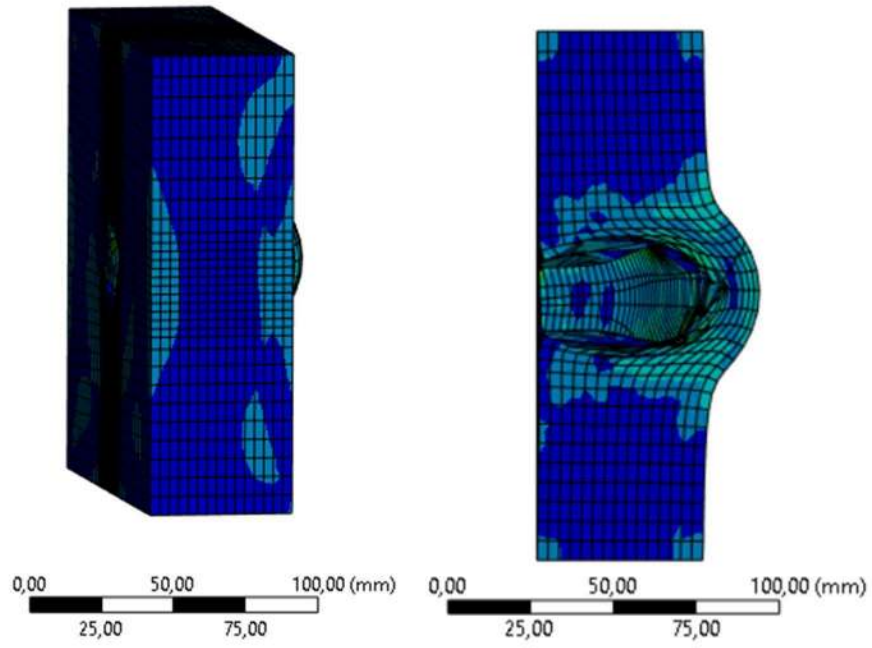
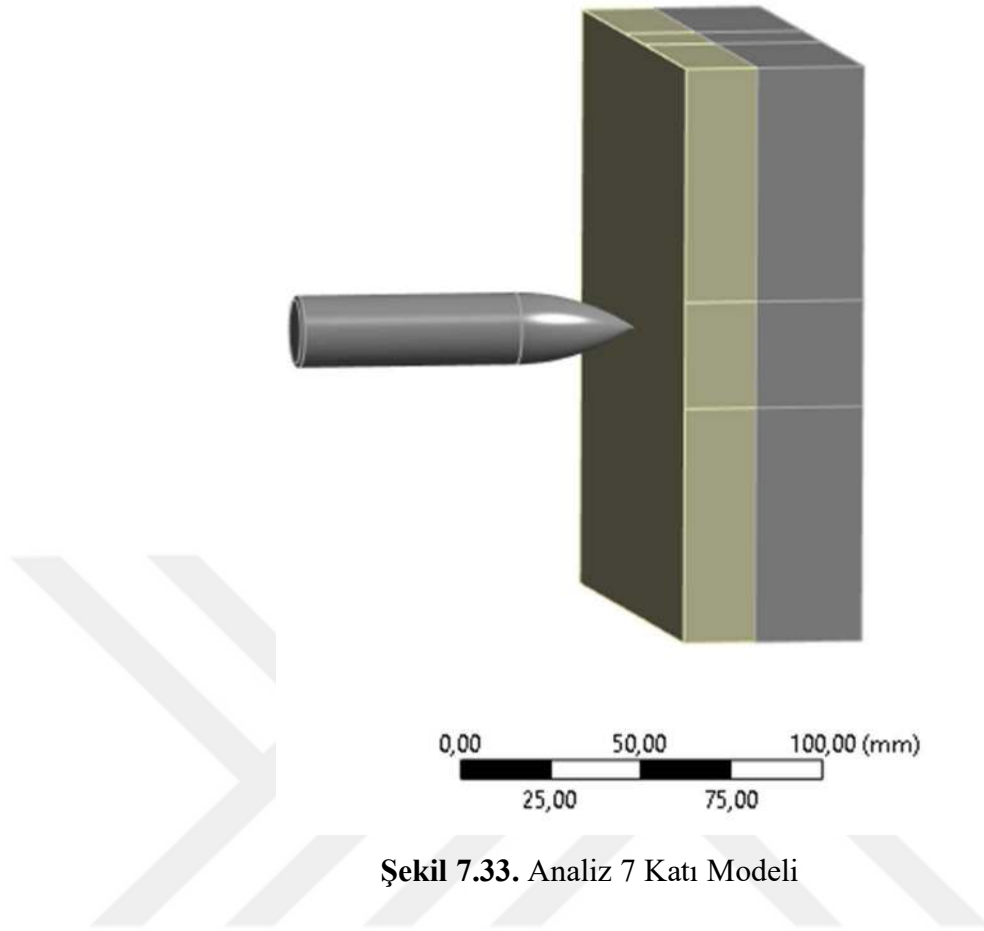
Hız değişim grafiği şekil 7.31’de verilmiştir. Aşağıda verilen şekil 7.32’den de anlaşılacağı gibi mermi 850 m/s hızında 17522 rad/s dönme ile 20mm kalınlığındaki boşluksuz  adet zırhı delememiştir.



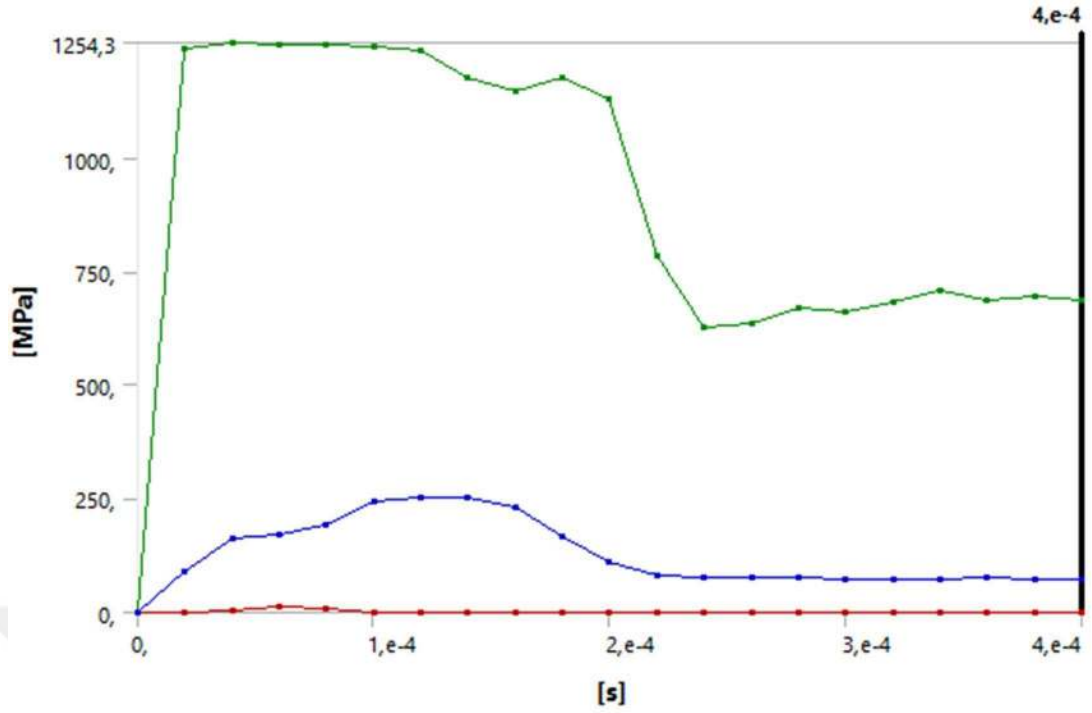
şekil 7.32. Analiz 6 Hız Probu Dağılımları

Analiz 7

Aralarında boşluk olmayan iki adet zırhın performansını test etmek için, ogive uçlu bir mermi kullanılarak 20mm ve 30mm kalınlığında Al5083-H116 malzemeden yapılmış zırh tasarlandı. Test, 22°C ortam sıcaklığında gerekleşmiş olup, mermi 850 m/s hızla ateşlendi ve 17522 rad/s dnüşle zırha arptı. Zırhın mermiyi durdurduğu görüldü.

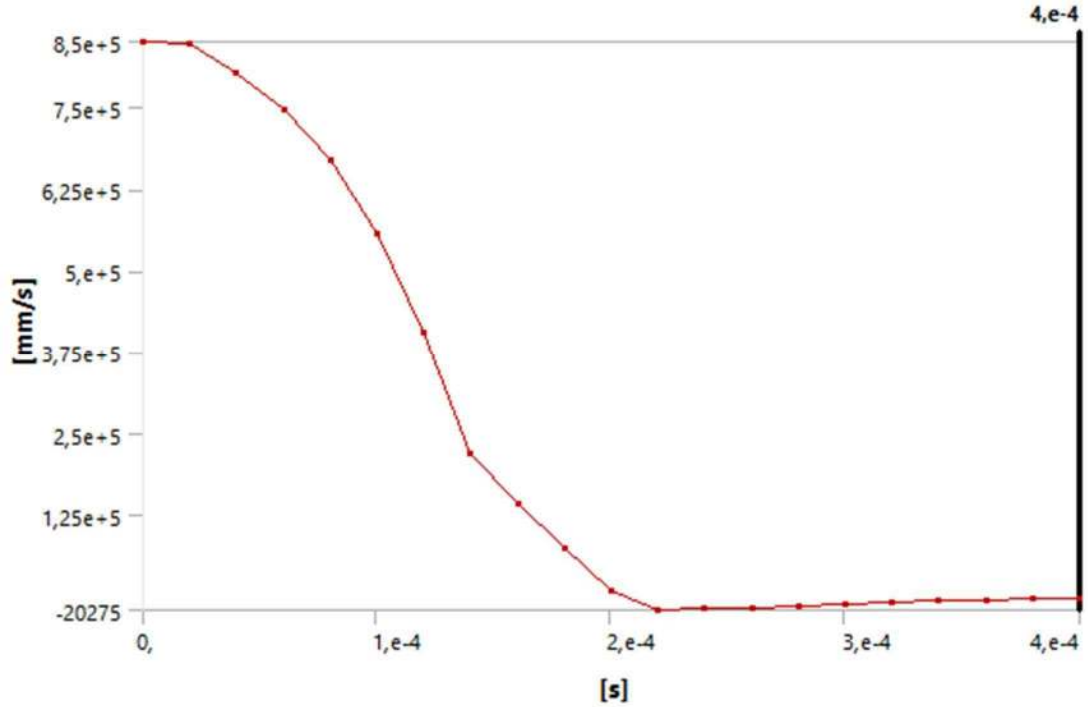


Şekil 7.34. Analiz 7 Eşdeğer Gerilme Dağılımları



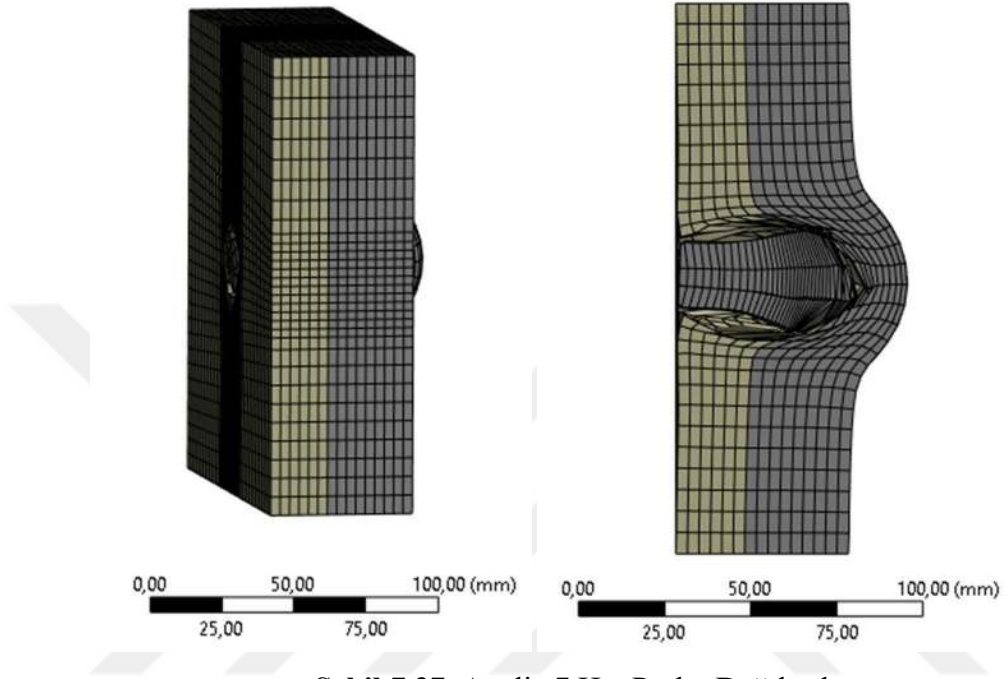
Şekil 7.35. Analiz 7 Eşdeğer Gerilme Grafiği

Analiz sonucu çıkan plastik şekil değişimi değerleri ve renklendirmeleri ile birlikte yukarıdaki Şekil 7.35’de verilmiştir.



Şekil 7.36. Analiz 7 Hız Probu Grafiği

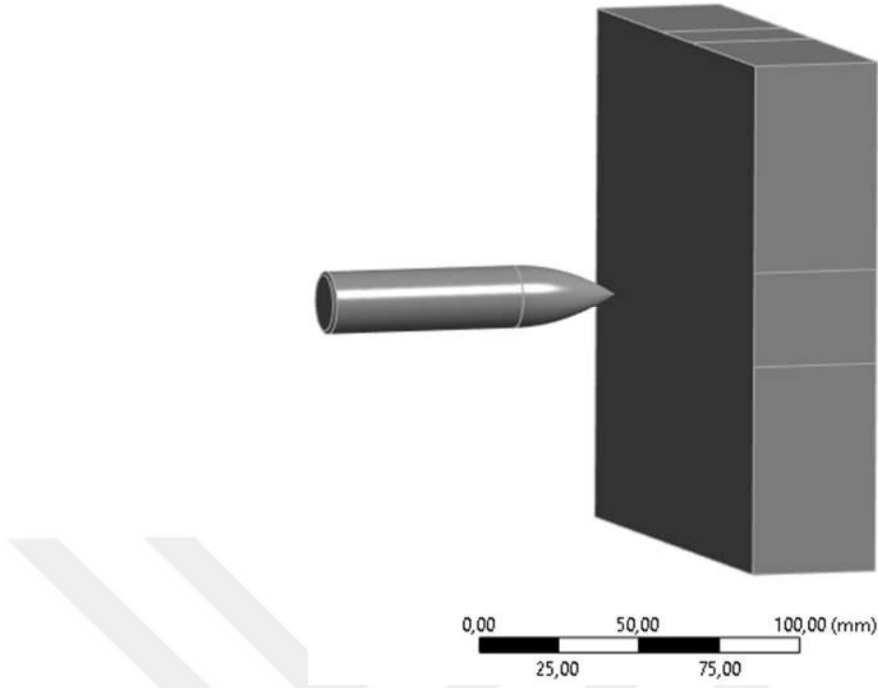
Hız değişim grafiği Şekil 7.36’de verilmiştir. Aşağıda verilen Şekil 7.37’den de anlaşılacağı gibi mermi 850 m/s hızında 17522 rad/s dönme ile 20mm ve 30mm kalınlığındaki boşluksuz iki adet zırhı delememiştir.



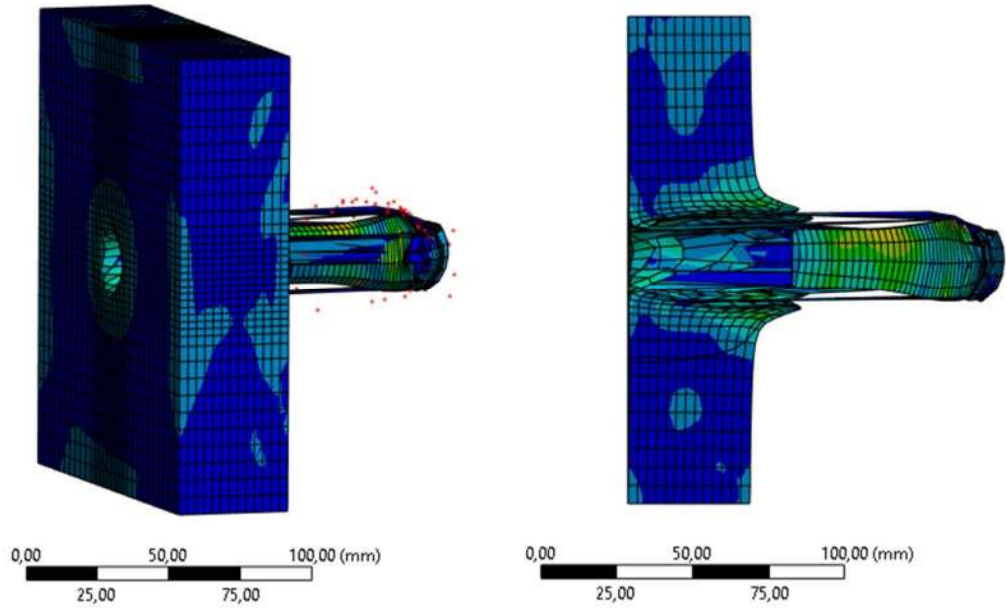
Şekil 7.37. Analiz 7 Hız Probu Dağılımları

Analiz 8

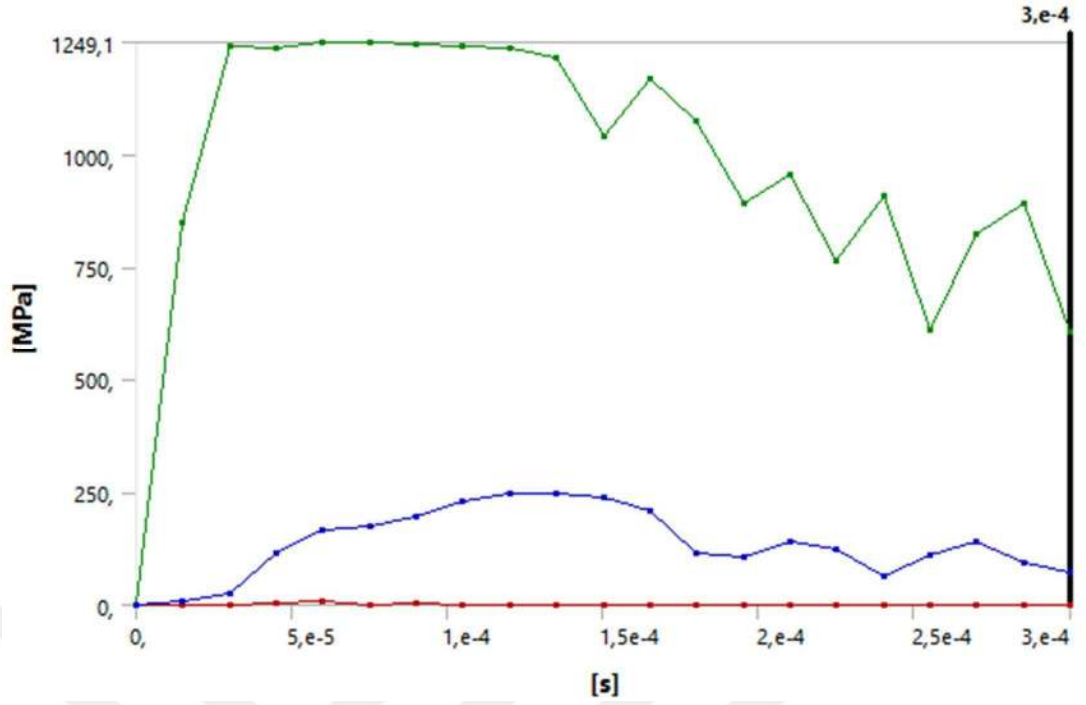
Bir zırhın performansını test etmek için, ogive uçlu bir mermi kullanılarak 40mm kalınlığında Al5083-H116 malzemeden yapılmış zırh tasarlandı. Test, 22°C ortam sıcaklığında gerçekleşmiş olup, mermi 850 m/s hızla ateşlendi ve 17522 rad/s dönüşle zırha çarptı. Ancak, zırh mermiyi durduramadı ve merminin zırhı terk etme hızı 383,2 m/s olarak ölçüldü.



Şekil 7.38. Analiz 8 Katı Modeli

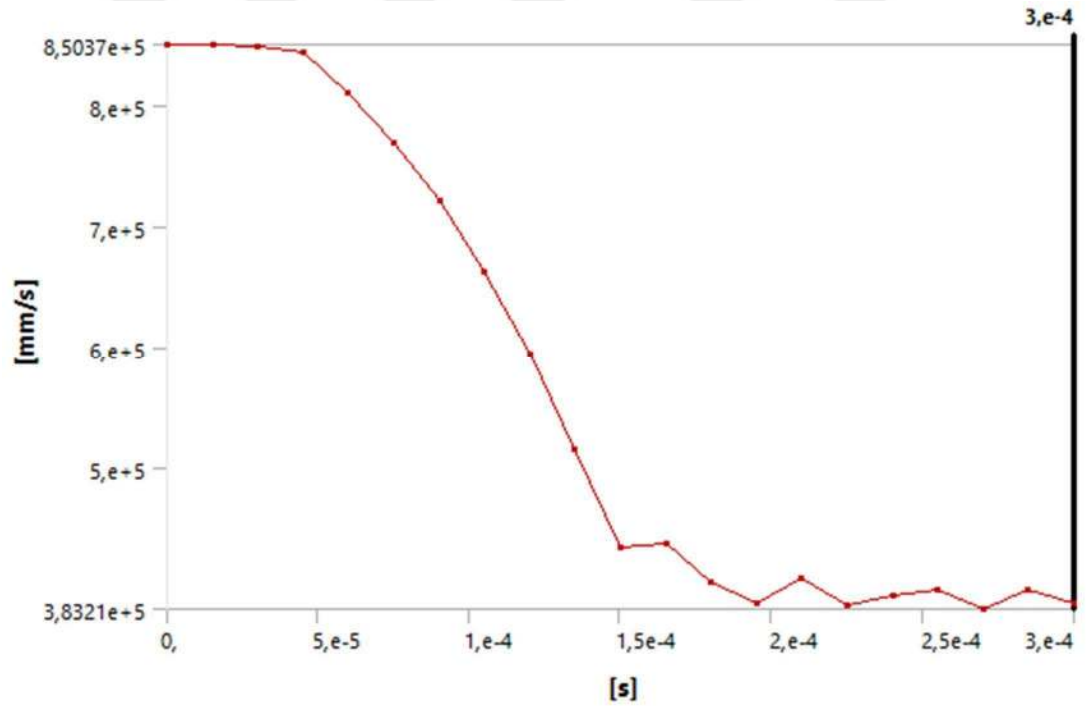


Şekil 7.39. Analiz 8 Eşdeğer Gerilme Dağılımları



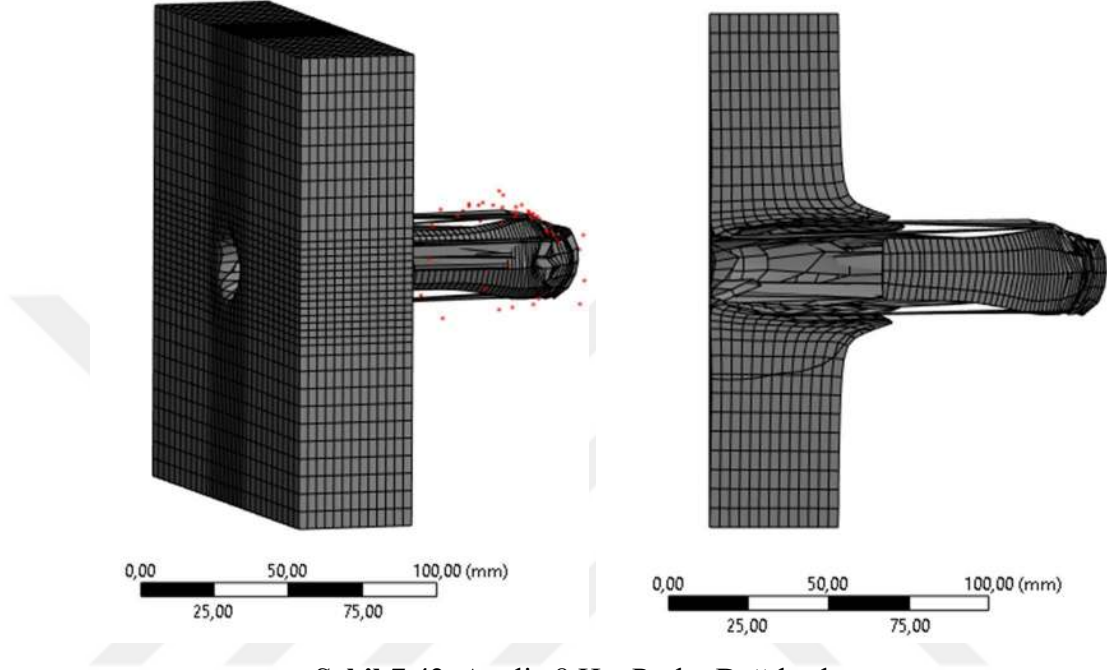
Şekil 7.40. Analiz 8 Eşdeğer Gerilme Grafiği

Analiz sonucu çıkan plastik şekil değişimi değerleri ve renklendirmeleri ile birlikte yukarıdaki Şekil 7.40'de verilmiştir.



Şekil 7.41. Analiz 8 Hız Probu Prafiği

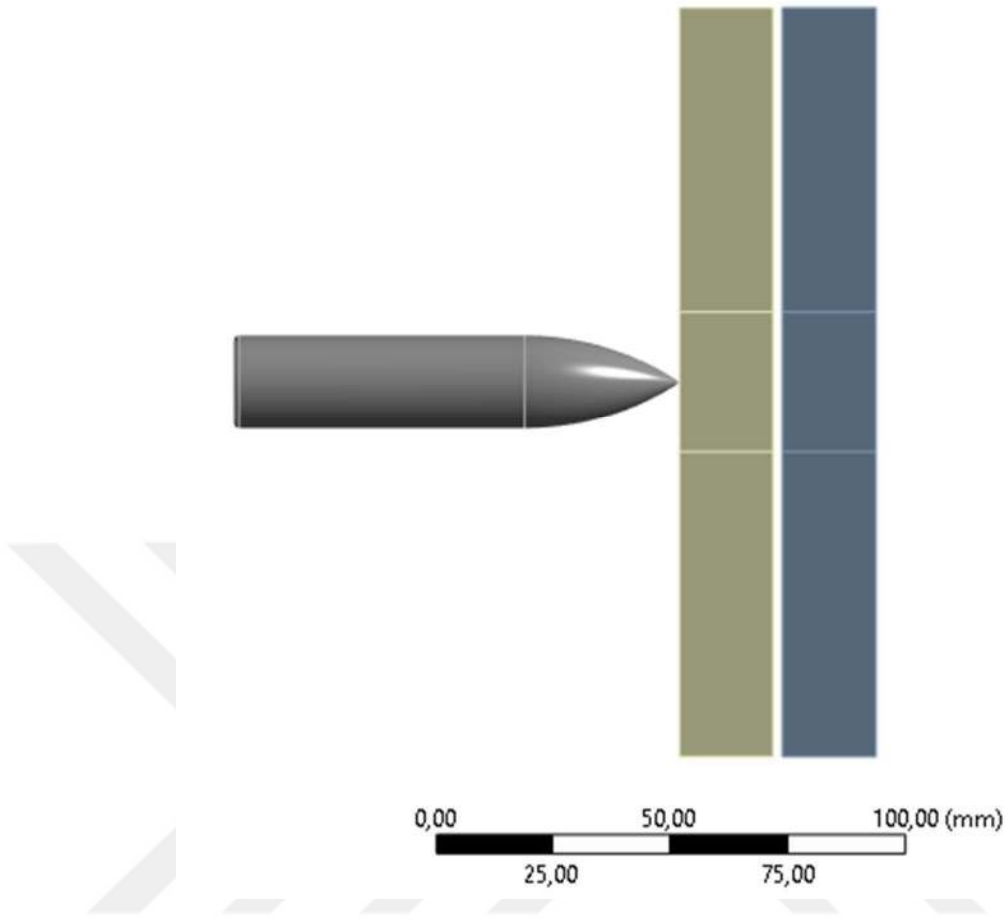
Hız değişim grafiği şekil 7.41’de verilmiştir. Aşağıda verilen şekil 7.42’den de anlaşılacağı gibi mermi 850 m/s hızında 17522 rad/s dönme ile 40mm kalınlığındaki bir adet zırhı delerek gemiştir.



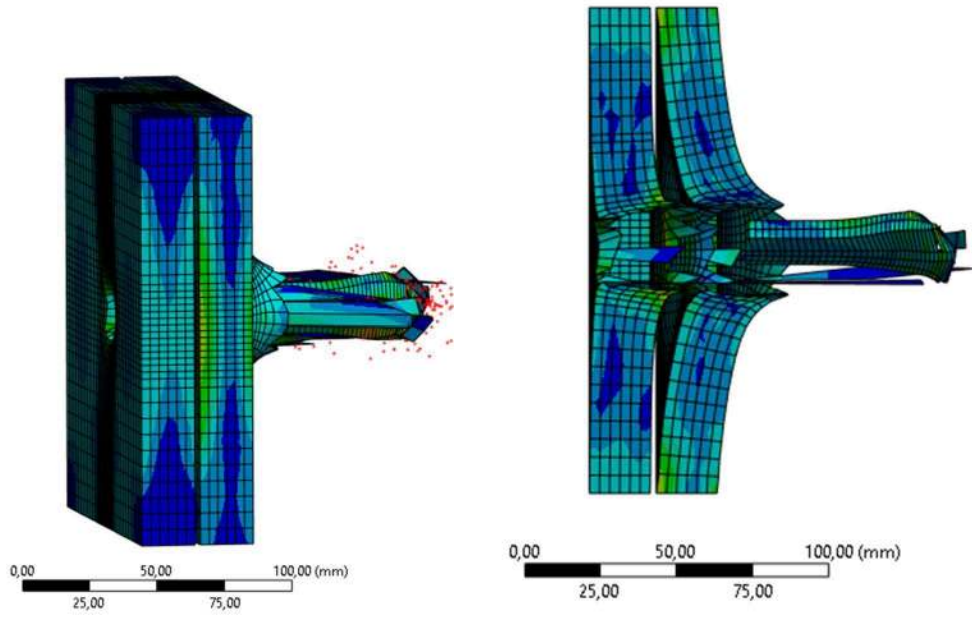
şekil 7.42. Analiz 8 Hız Probu Dağılımları

Analiz 9

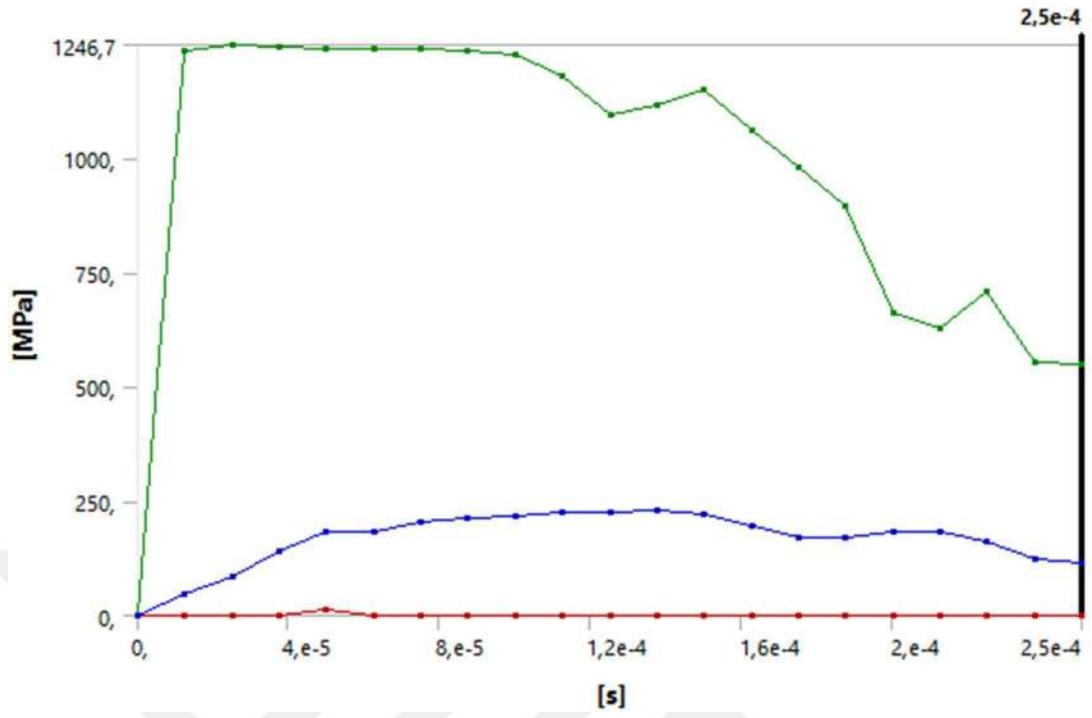
Aralarında 2mm boşluk bulunan iki adet zırhın performansını test etmek için, ogive uçlu bir mermi kullanılarak 20mm (20+20m) kalınlığında Al5083-H116 malzemeden yapılmış zırh tasarlandı. Test, 22°C ortam sıcaklığında gerekleşmiş olup, mermi 850 m/s hızla ateşlendi ve 17522 rad/s dnüşle zırha arptı. Ancak, zırh mermiyi durduramadı ve merminin zırhı terk etme hızı 442,7 m/s olarak ölçüldü.



Şekil 7.43. Analiz 9 Katı Modeli

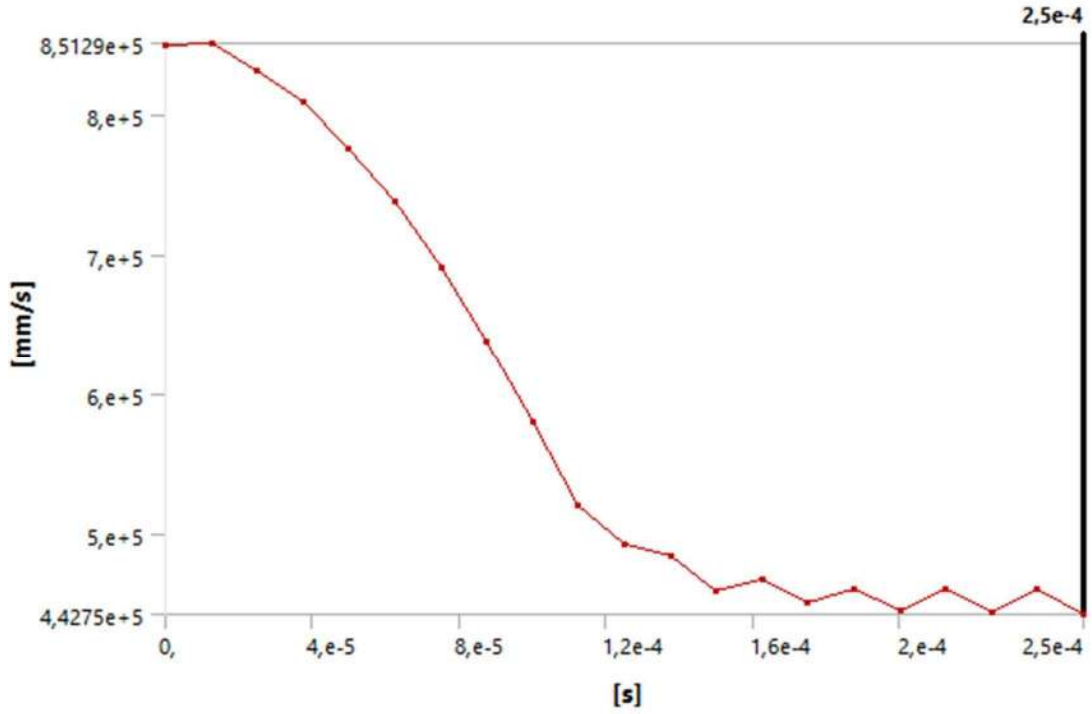


Şekil 7.44. Analiz 9 Eşdeğer Gerilme Dağılımları



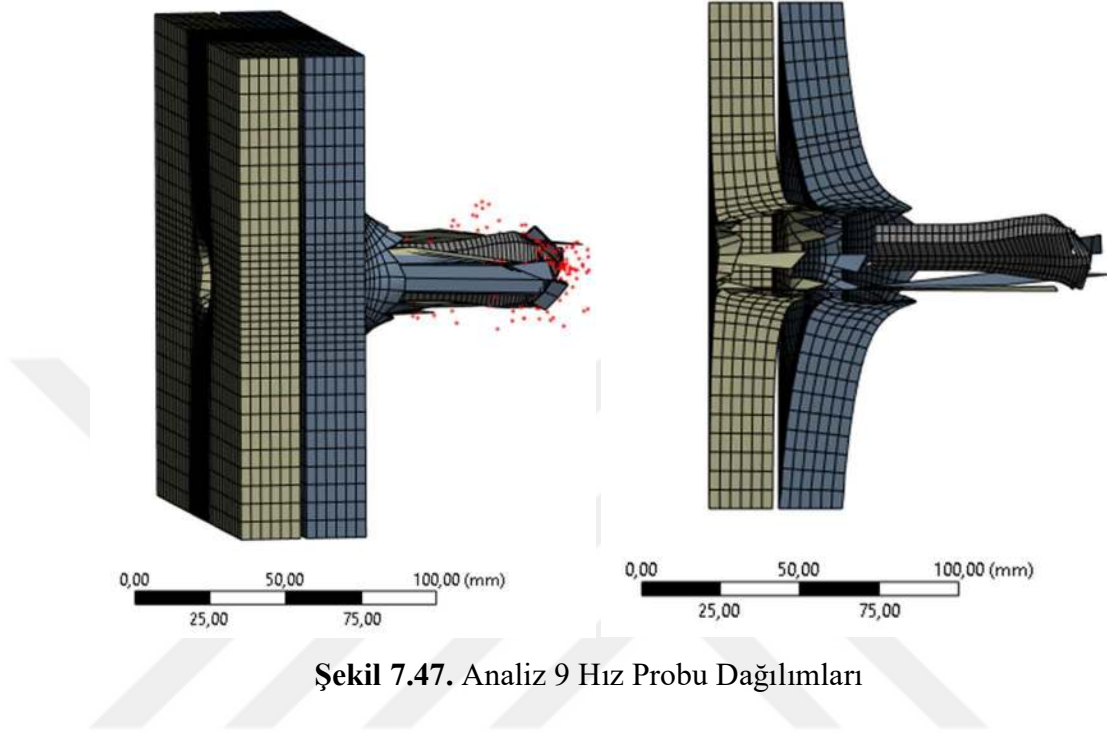
Şekil 7.45. Analiz 9 Eşdeğer Gerilme Grafiği

Analiz sonucu çıkan plastik şekil değişimi değerleri ve renklendirmeleri ile birlikte yukarıdaki Şekil 7.45'te verilmiştir.



Şekil 7.46. Analiz 9 Hız Probu Grafiği

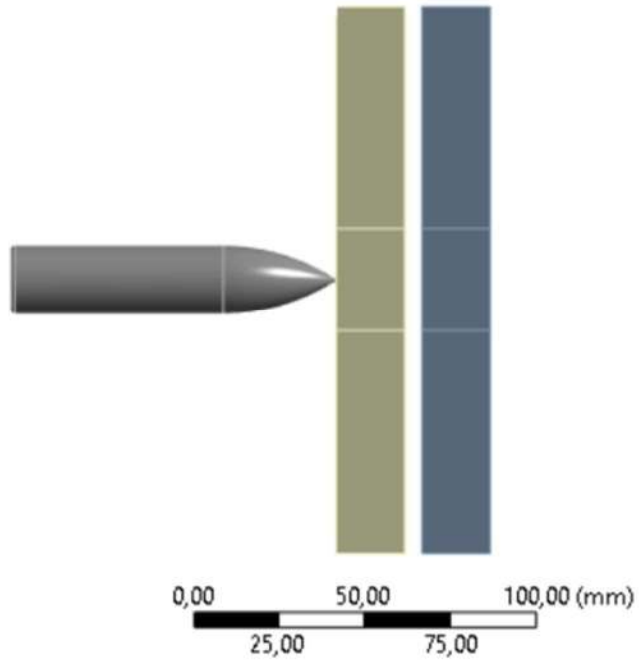
Hız değişim grafiği şekil 7.45’de verilmiştir. Aşağıda verilen şekil 7.46’dan de anlaşılacağı gibi mermi 850 m/s hızında 17522 rad/s dönme ile 20mm kalınlığındaki aralarında 2mm boşluk bulunan iki adet zırhı delmiştir.



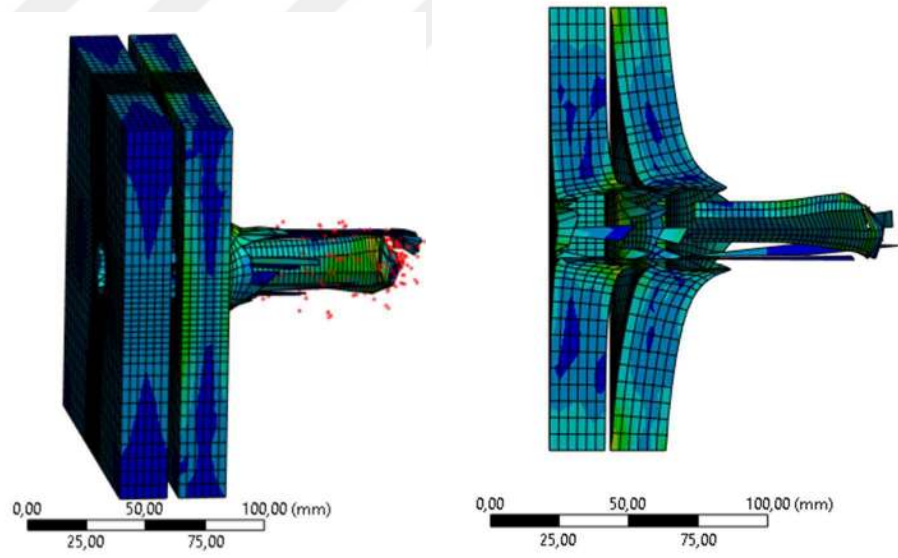
şekil 7.47. Analiz 9 Hız Probu Dağılımları

Analiz 10

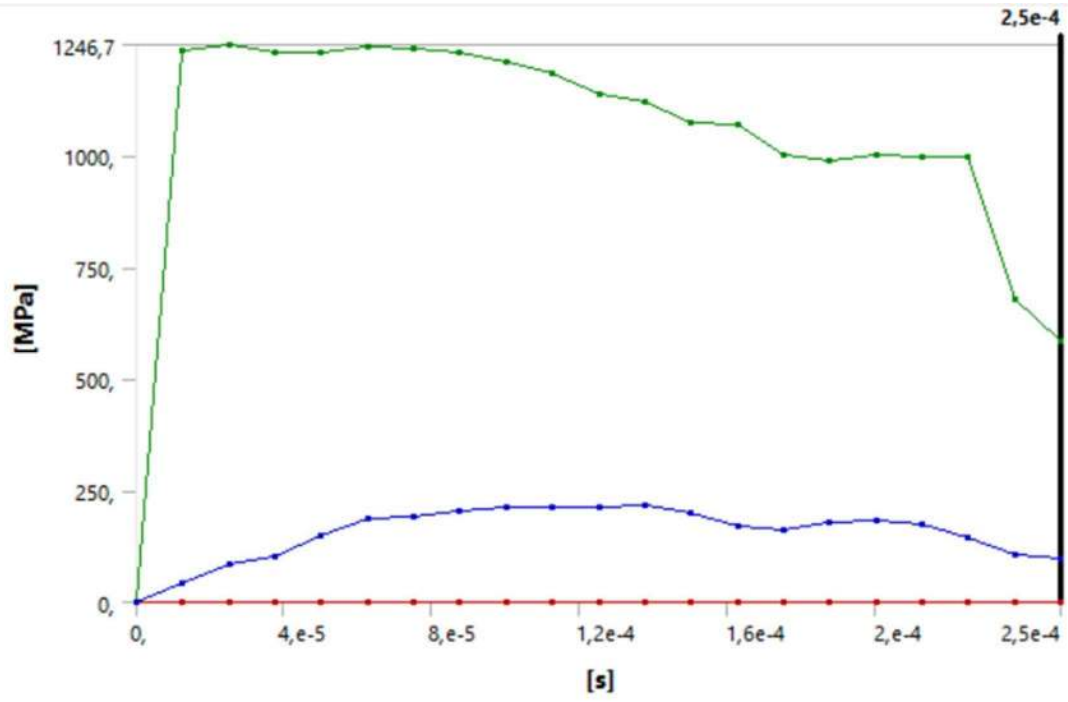
Aralarında 5 mm boşluk bulunan iki adet zırhın performansını test etmek için, ogive uçlu bir mermi kullanılarak 20mm (20+20m) kalınlığında Al5083-H116 malzemeden yapılmış zırh tasarlandı. Test, 22°C ortam sıcaklığında gerekleşmiş olup, mermi 850 m/s hızla ateşlendi ve 17522 rad/s dnüşle zırha arptı. Ancak, zırh mermiyi durduramadı ve merminin zırhı terk etme hızı 486,9 m/s olarak ölçüldü.



Şekil 7.48. Analiz 10 Katı Modeli

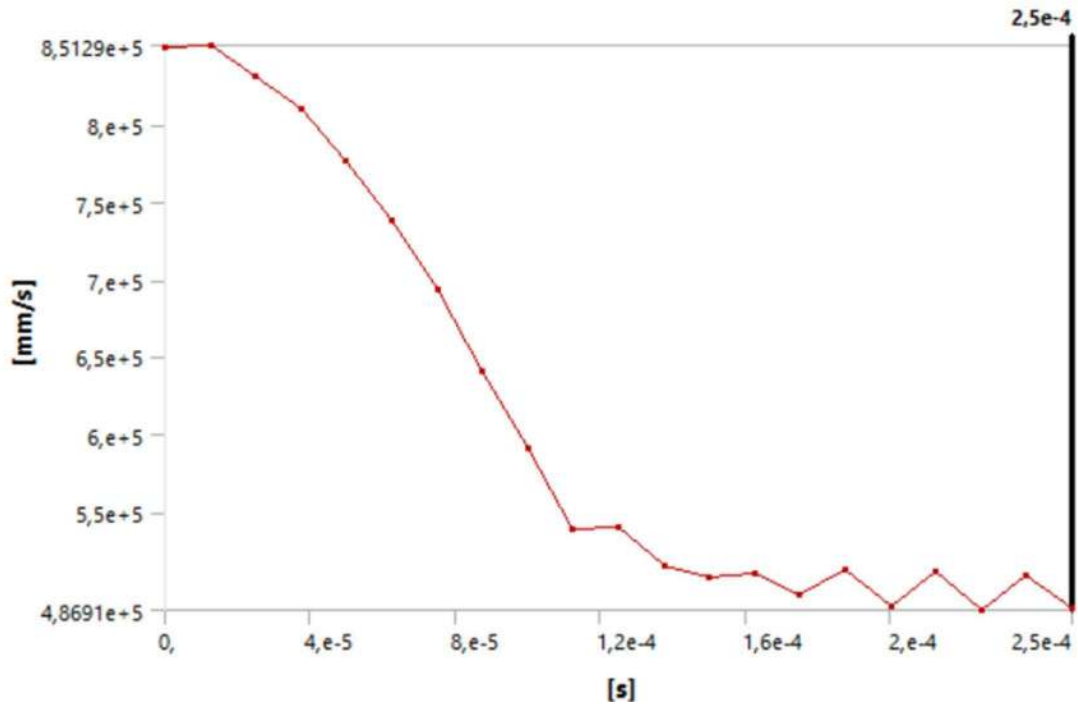


Şekil 7.48. Analiz 10 Eşdeğer Gerilme Dağılımları



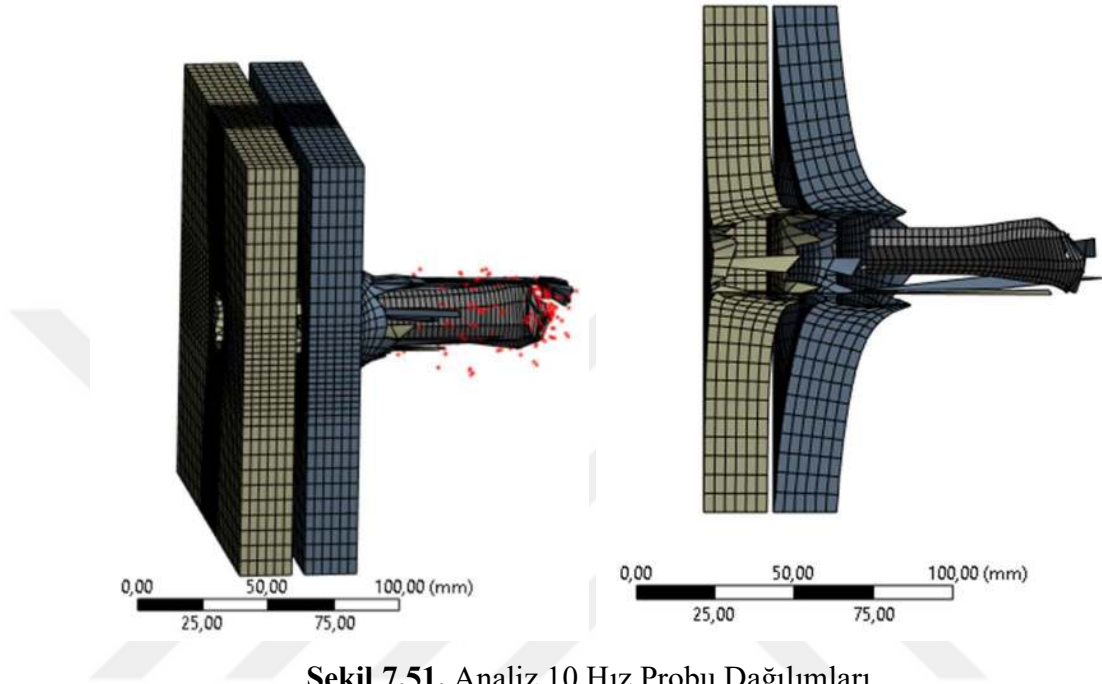
Şekil 7.49. Analiz 10 Eşdeğer Gerilme Grafiği

Analiz sonucu çıkan plastik şekil değişimi değerleri ve renklendirmeleri ile birlikte yukarıdaki Şekil 7.49’de verilmiştir.



Şekil 7.50. Analiz 10 Hız Probu Grafiği

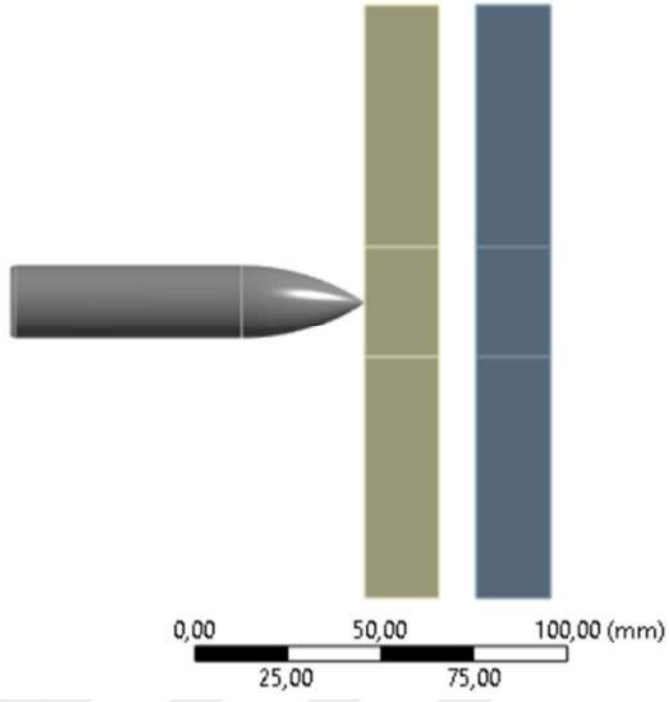
Hız değişim grafiği şekil 7.50’de verilmiştir. Aşağıda verilen şekil 7.51’den de anlaşılacağı gibi mermi 850 m/s hızında 17522 rad/s dönme ile 20mm kalınlığındaki aralarında 5 mm boşluk bulunan iki adet zırhı delmiştir.



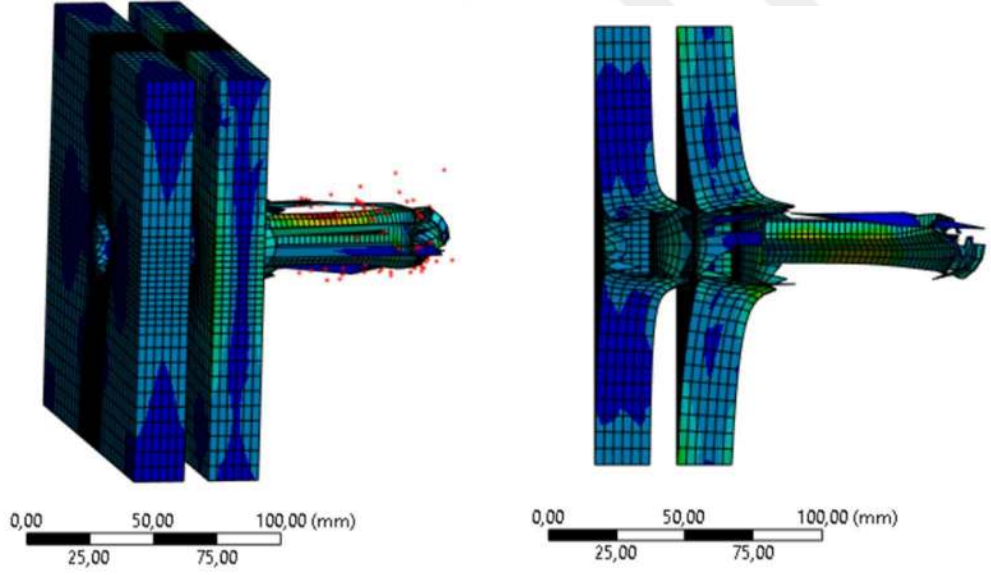
şekil 7.51. Analiz 10 Hız Probu Dağılımları

Analiz 11

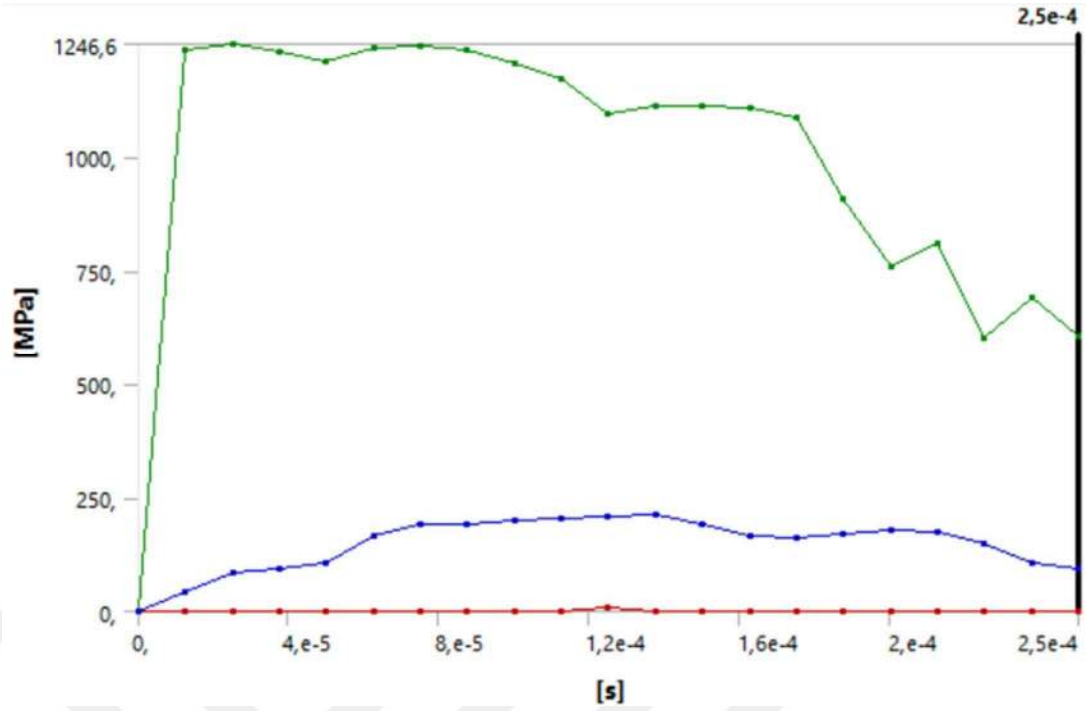
Aralarında 10 mm boşluk bulunan iki adet zırhın performansını test etmek için, ogive uçlu bir mermi kullanılarak 20mm (20+20m) kalınlığında Al5083-H116 malzemeden yapılmış zırh tasarlandı. Test, 22°C ortam sıcaklığında gerekleşmiş olup, mermi 850 m/s hızla ateşlendi ve 17522 rad/s dnüşle zırha arptı. Ancak, zırh mermiyi durduramadı ve merminin zırhı terk etme hızı 508,8 m/s olarak ölçüldü.



Şekil 7.52. Analiz 11 Katı Modeli

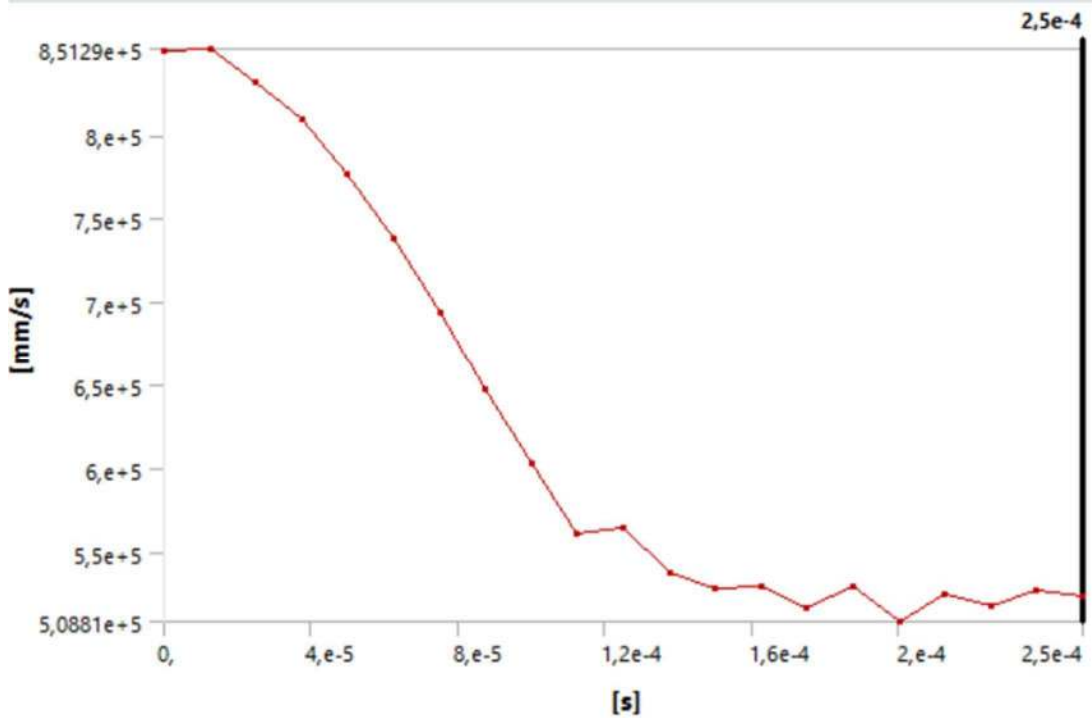


Şekil 7.53. Analiz 11 Eşdeğer Gerilme Dağılımları



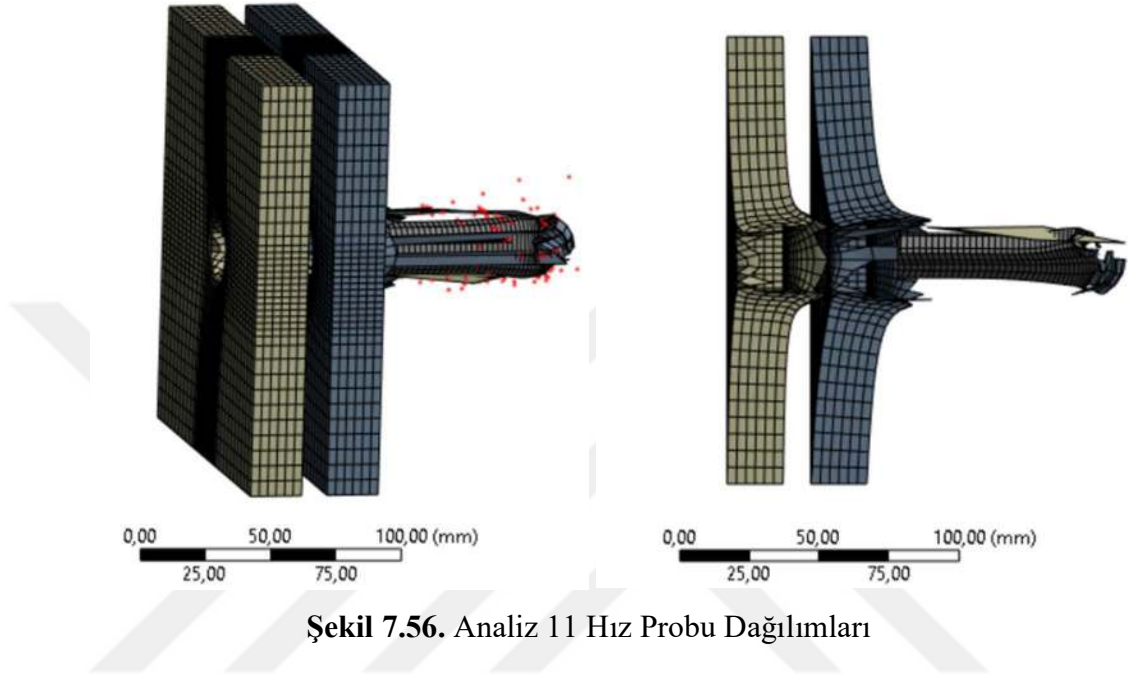
Şekil 7.54. Analiz 11 Eşdeğer Gerilme Grafiği

Analiz sonucu çıkan plastik şekil değişimi değerleri ve renklendirmeleri ile birlikte yukarıdaki Şekil 7.54’de verilmiştir.



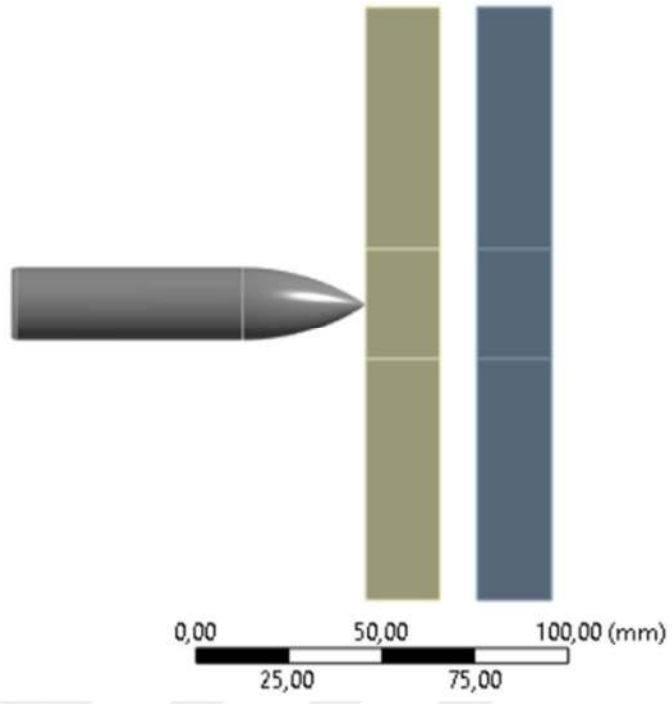
Şekil 7.55. Analiz 11 Hız Probu Grafiği

Hız değişim grafiği şekil 7.55’de verilmiştir. Aşağıda verilen şekil 7.56’dan de anlaşılacağı gibi mermi 850 m/s hızında 17522 rad/s dönme ile 20mm kalınlığındaki aralarında 10 mm boşluk bulunan iki adet zırhı delmiştir.

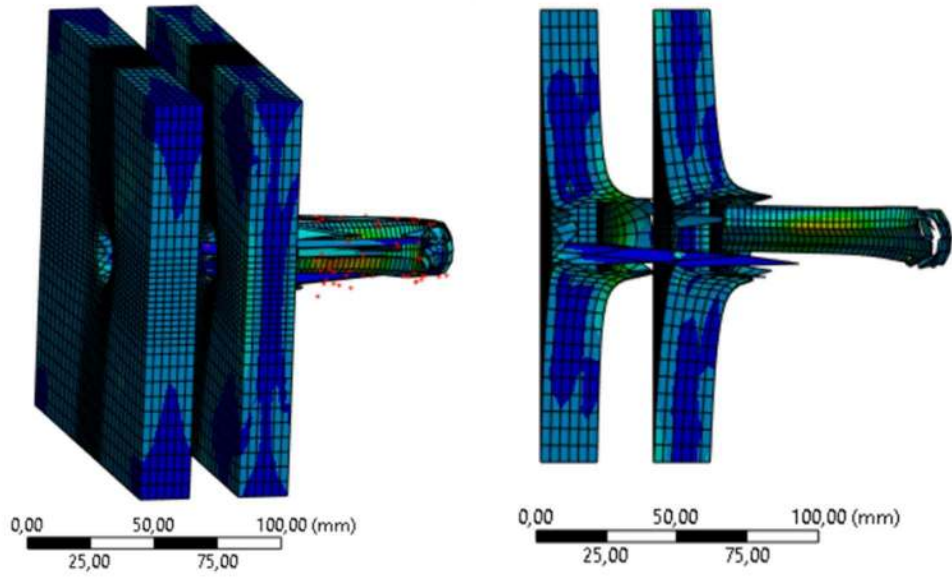


Analiz 12

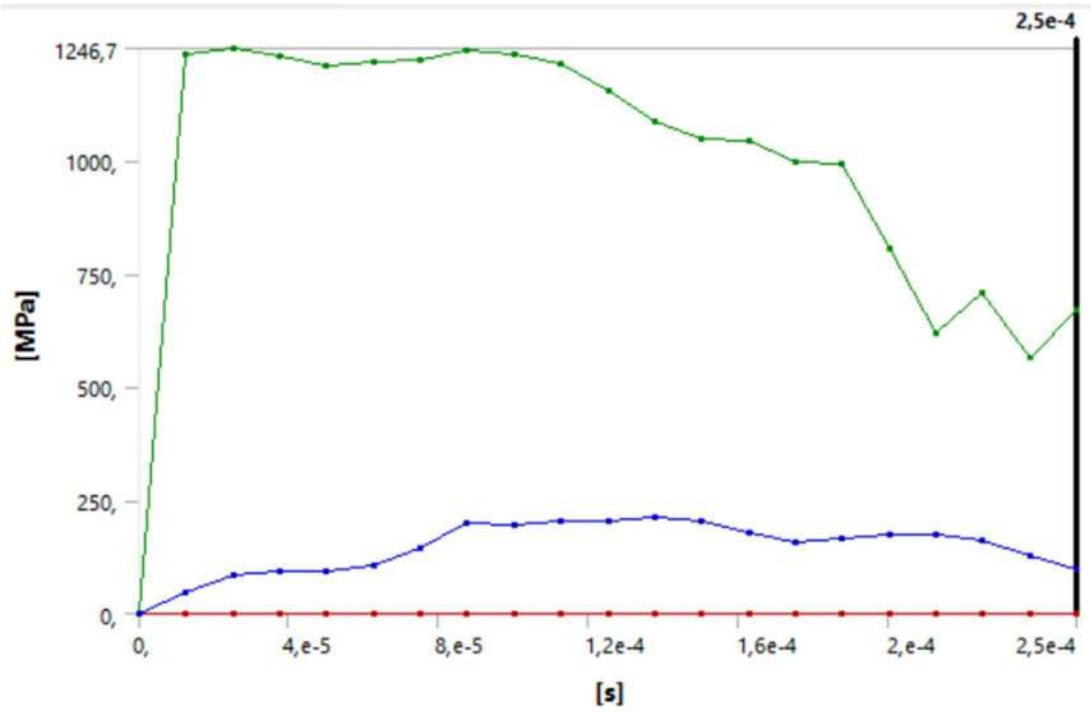
Aralarında 20 mm boşluk bulunan iki adet zırhın performansını test etmek için, ogive uçlu bir mermi kullanılarak 20mm (20+20m) kalınlığında Al5083-H116 malzemedan yapılmış zırh tasarlandı. Test, 22°C ortam sıcaklığında gerekleşmiş olup, mermi 850 m/s hızla ateşlendi ve 17522 rad/s dnüşle zırha arpıtı. Ancak, zırh mermiyi durduramadı ve merminin zırhı terk etme hızı 527,7 m/s olarak ölçüldü.



Şekil 7.57. Analiz 12 Katı Modeli

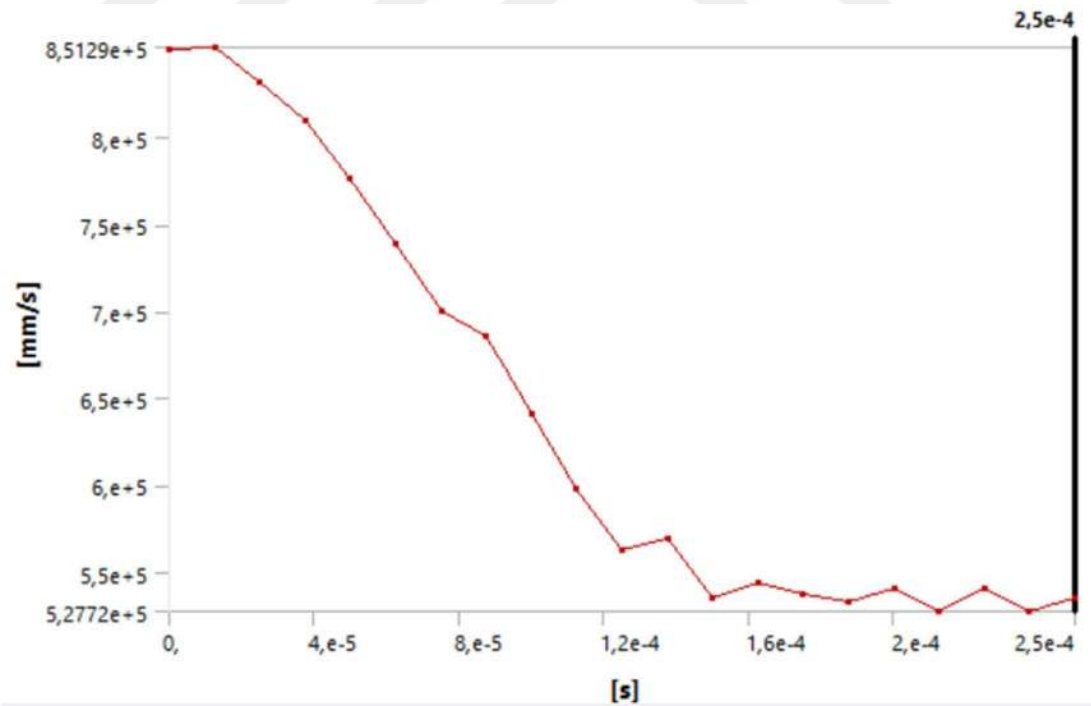


Şekil 7.58. Analiz 12 Eşdeğer Gerilme Dağılımları



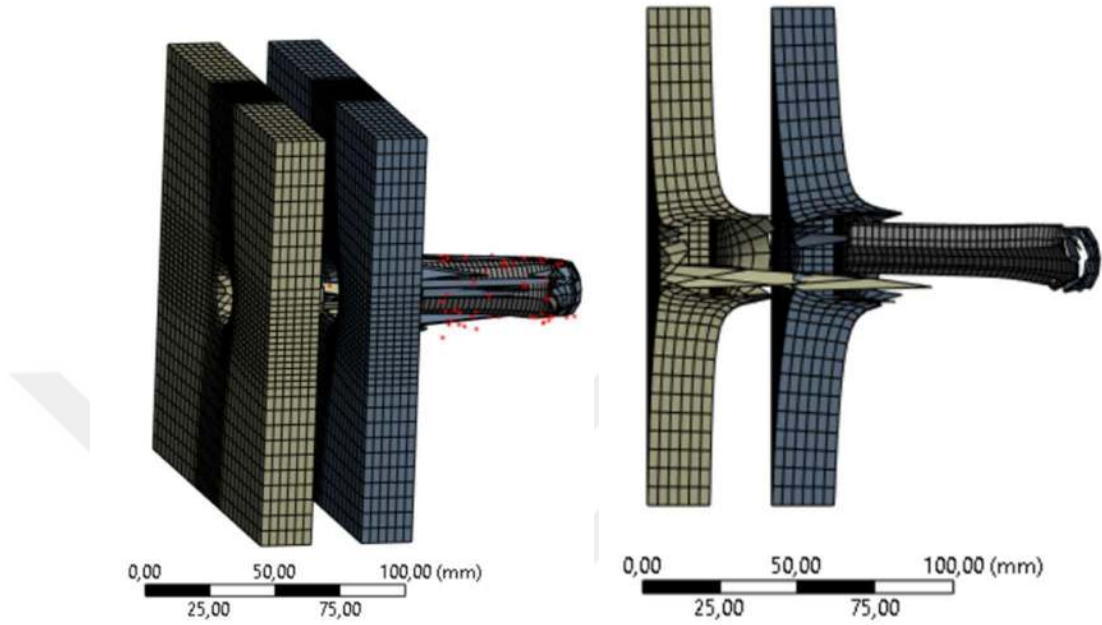
Şekil 7.59. Analiz 12 Eşdeğer Gerilme Grafiği

Analiz sonucu çıkan plastik şekil değişimi değerleri ve renklendirmeleri ile birlikte yukarıdaki Şekil 7.59’de verilmiştir.



Şekil 7.60. Analiz 12 Hız Probu Grafiği

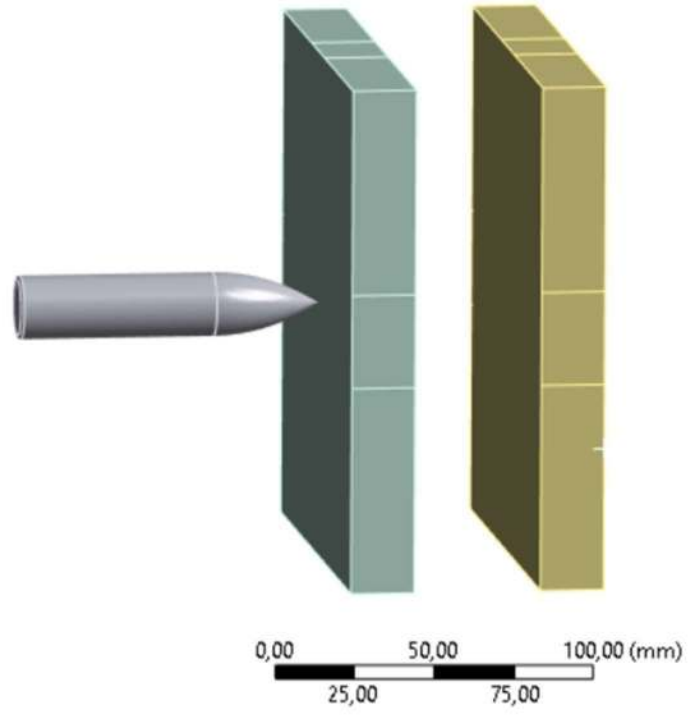
Hız değişim grafiği şekil 7.60’de verilmiştir. Aşağıda verilen şekil 7.61’den de anlaşılacağı gibi mermi 850 m/s hızında 17522 rad/s dönme ile 20mm kalınlığındaki aralarında 20 mm boşluk bulunan iki adet zırhı delmiştir.



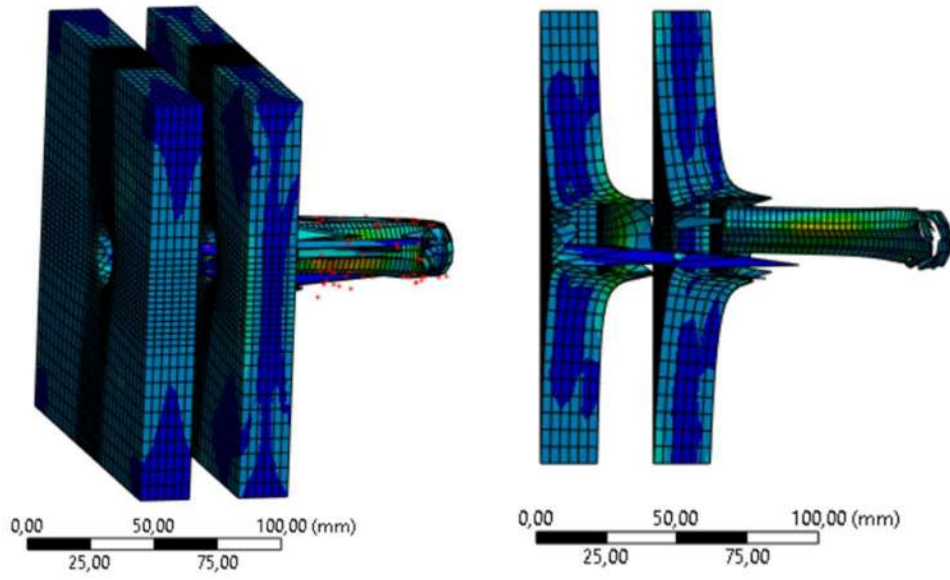
şekil 7.61. Analiz 12 Hız Probu Dağılımları

Analiz 13

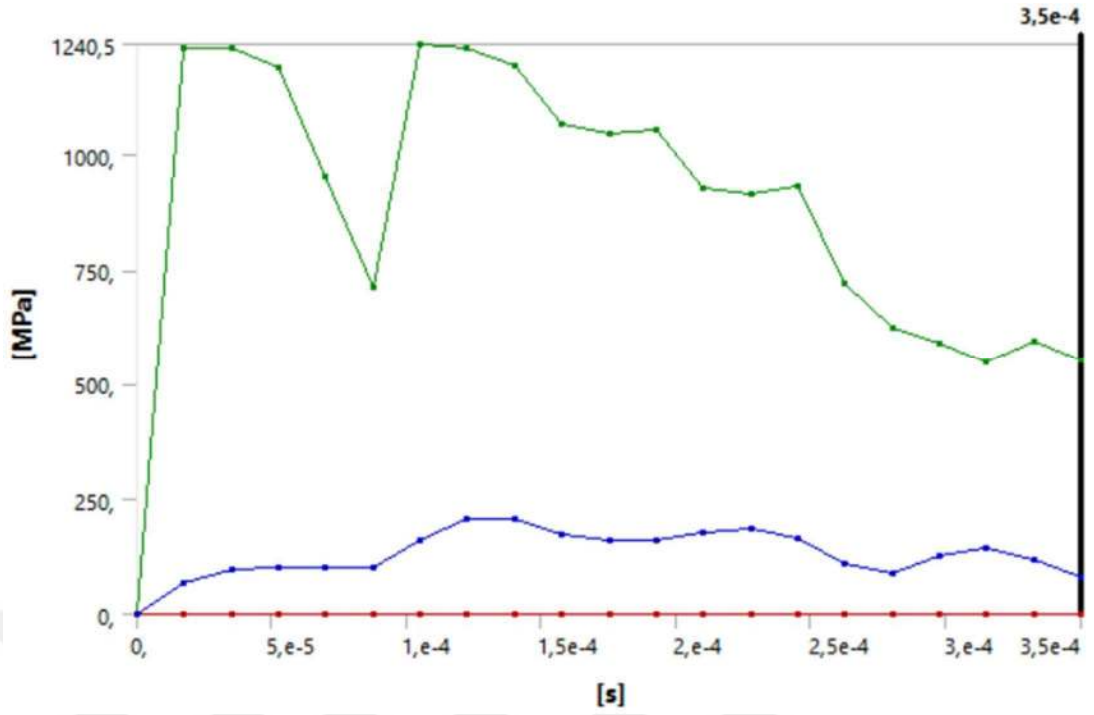
Aralarında 40 mm boşluk bulunan iki adet zırhın performansını test etmek için, ogive uçlu bir mermi kullanılarak 20mm (20+20m) kalınlığında Al5083-H116 malzemeden yapılmış zırh tasarlandı. Test, 22°C ortam sıcaklığında gerekleşmiş olup, mermi 850 m/s hızla ateşlendi ve 17522 rad/s dnüşle zırha arptı. Ancak, zırh mermiyi durduramadı ve merminin zırhı terk etme hızı 513,5 m/s olarak ölçüldü.



Şekil 7.62. Analiz 13 Katı Modeli

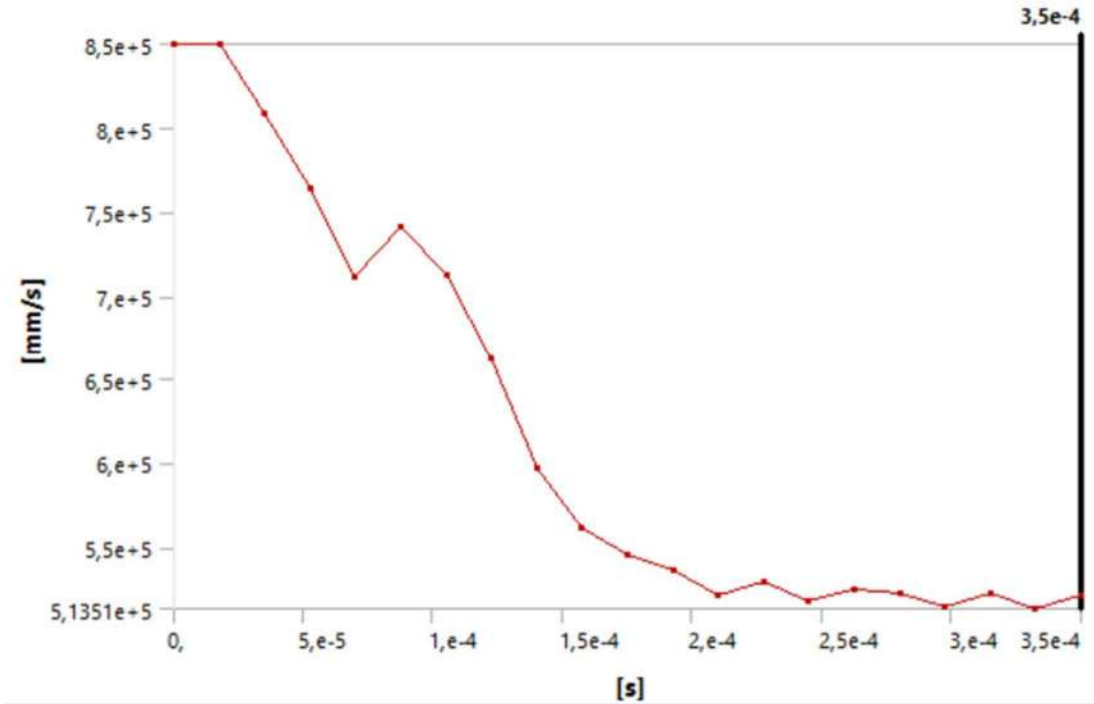


Şekil 7.63. Analiz 13 Eşdeğer Gerilme Dağılımları



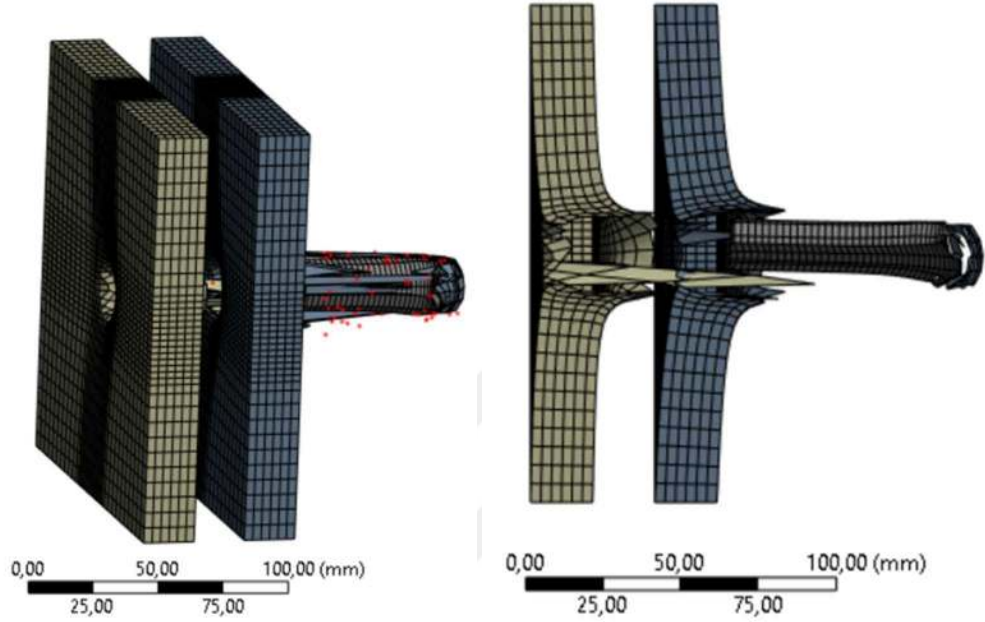
Şekil 7.64. Analiz 13 Eşdeğer Gerilme Grafiği

Analiz sonucu çıkan plastik şekil değişimi değerleri ve renklendirmeleri ile birlikte yukarıdaki Şekil 7.64’de verilmiştir.



Şekil 7.65. Analiz 13 Hız Probu Grafiği

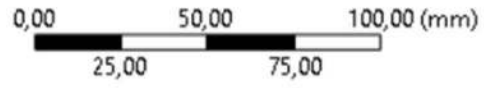
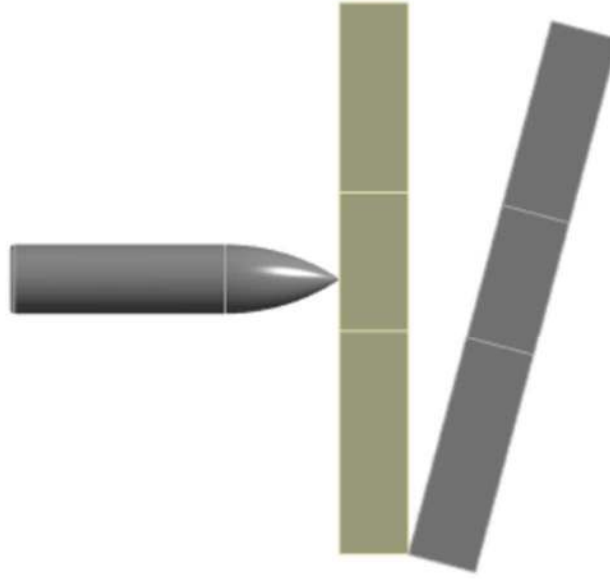
Hız değişim grafiği şekil 7.65’de verilmiştir. Aşağıda verilen şekil 7.66’dan de anlaşılacağı gibi mermi 850 m/s hızında 17522 rad/s dđnme ile 20mm kalınlığındaki aralarında 20 mm boşluk bulunan iki adet zırhı delmiştir.



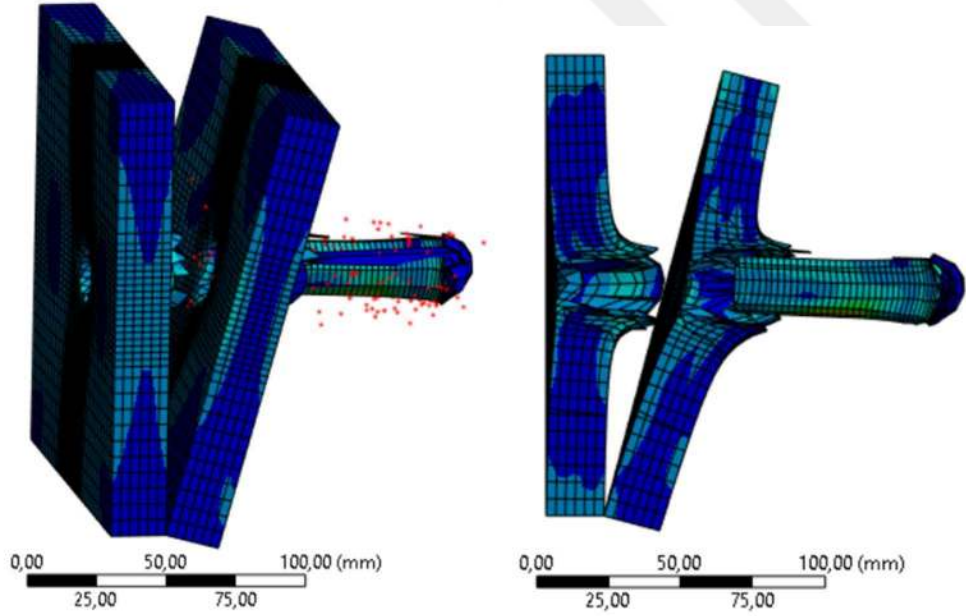
şekil 7.66. Analiz 13 Hız Probu Dağılımları

Analiz 14

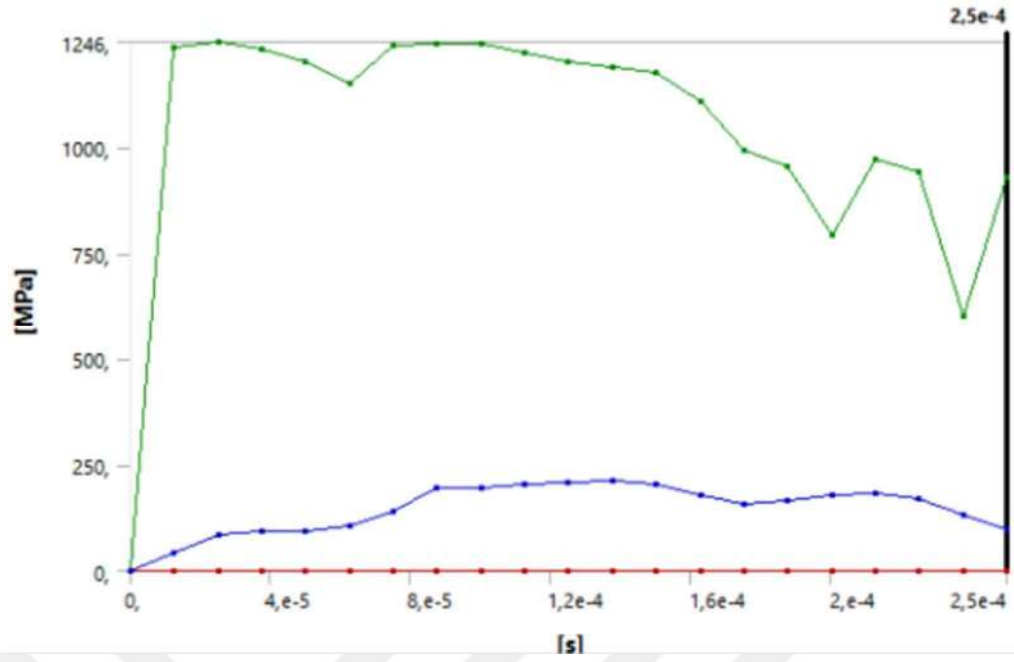
Aralarında 15° açı bulunan iki adet zırhın performansını test etmek için, ogive uçlu bir mermi kullanılarak 20mm (20+20m) kalınlığında Al5083-H116 malzemeden yapılmış zırh tasarlandı. Test, 22°C ortam sıcaklığında gerekleşmiş olup, mermi 850 m/s hızla ateşlendi ve 17522 rad/s dđnüşle zırha arptı. Ancak, zırh mermiyi durduramadı ve merminin zırhı terk etme hızı 528,4 m/s olarak ۆlüldü.



Şekil 7.67. Analiz 14 Katı Modeli

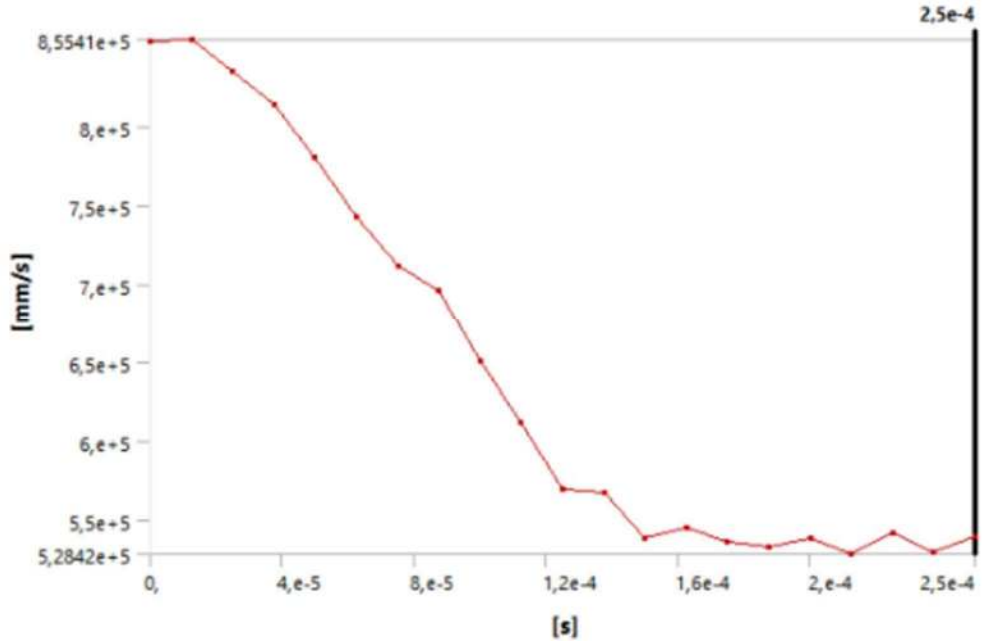


Şekil 7.68. Analiz 14 Eşdeğer Gerilme Dağılımları



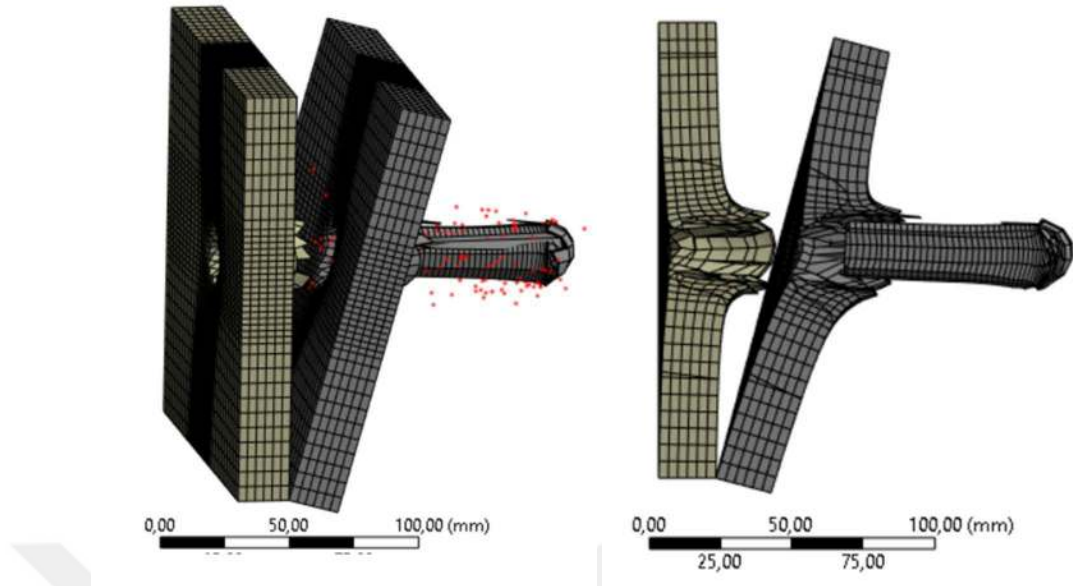
Şekil 7.69. Analiz 14 Eşdeğer Gerilme Grafiği

Analiz sonucu çıkan plastik şekil değişimi değerleri ve renklendirmeleri ile birlikte yukarıdaki Şekil 7.69’de verilmiştir.



Şekil 7.70. Analiz 14 Hız Probu Grafiği

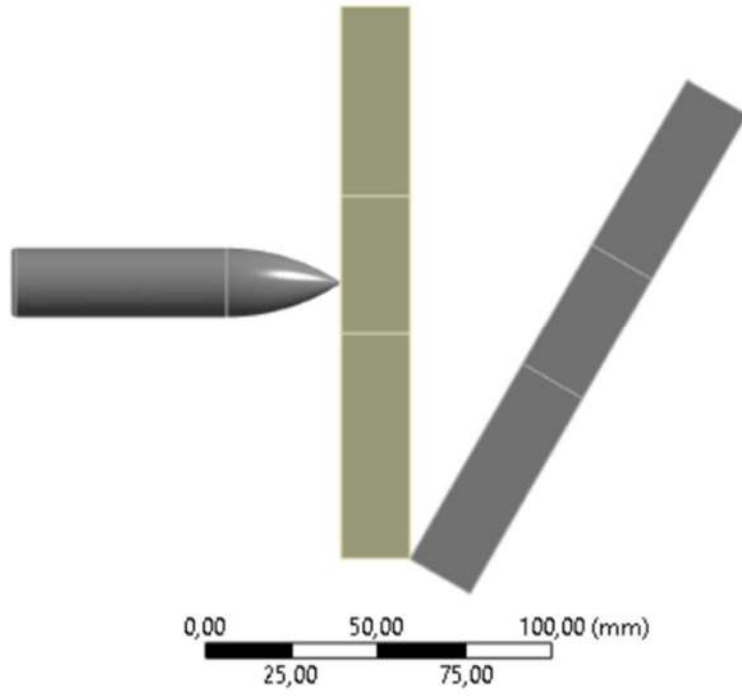
Hız değişim grafiği Şekil 7.70’de verilmiştir. Aşağıda verilen Şekil 7.71’den de anlaşılacağı gibi mermi 850 m/s hızında 17522 rad/s dönme ile 20mm kalınlığındaki aralarında 15° açı bulunan iki adet zırhı delmiştir.



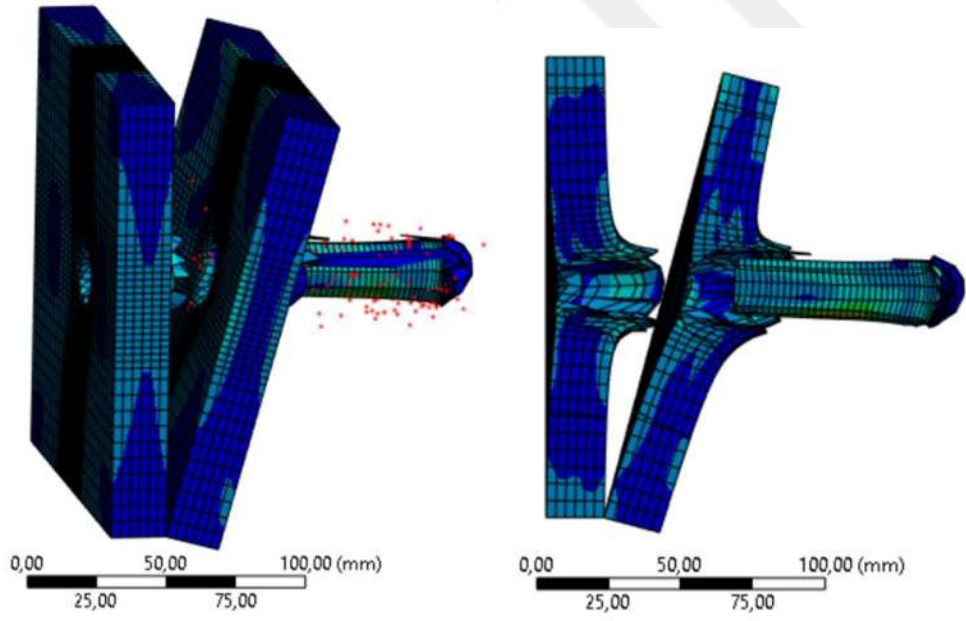
Şekil 7.71. Analiz 14 Hız Probu Dağılımları

Analiz 15

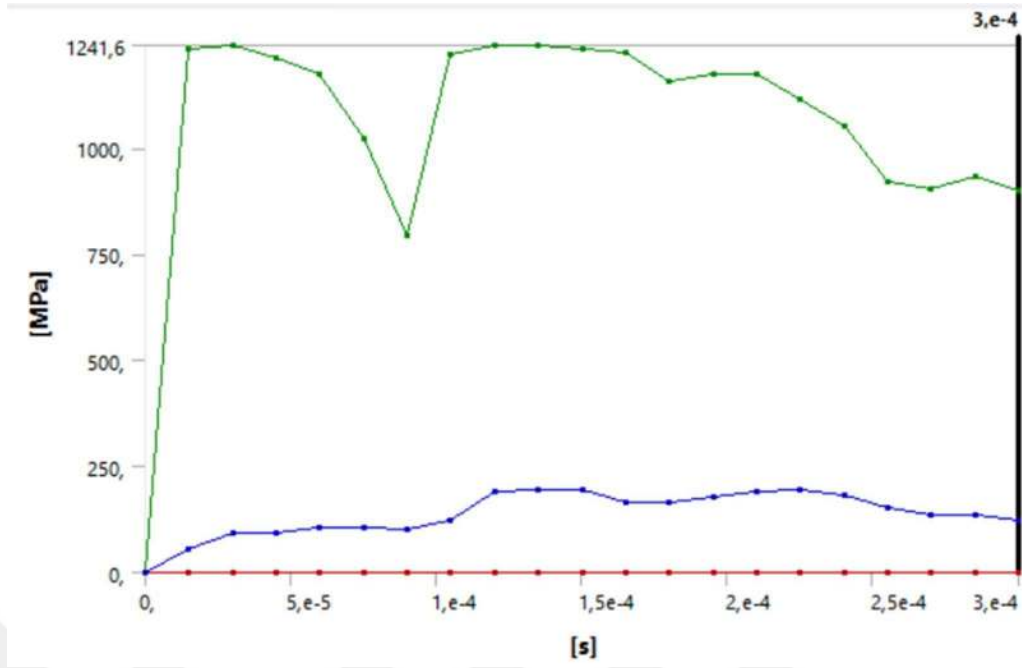
Aralarında 30° açı bulunan iki adet zırhın performansını test etmek için, ogive uçlu bir mermi kullanılarak 20mm (20+20m) kalınlığında A15083-H116 malzemeden yapılmış zırh tasarlandı. Test, 22°C ortam sıcaklığında gerçekleşmiş olup, mermi 850 m/s hızla ateşlendi ve 17522 rad/s dönüşle zırha çarptı. Ancak, zırh mermiyi durduramadı ve merminin zırhı terk etme hızı 461,2 m/s olarak ölçüldü.



Şekil 7.72. Analiz 15 Katı Modeli

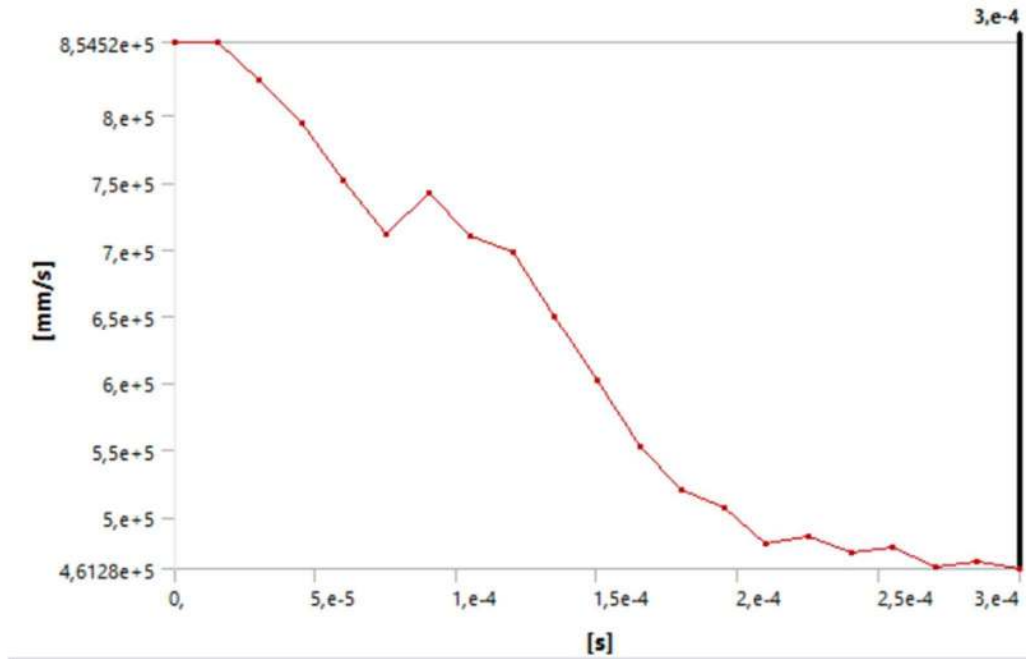


Şekil 7.73. Analiz 15 Eşdeğer Gerilme Dağılımları



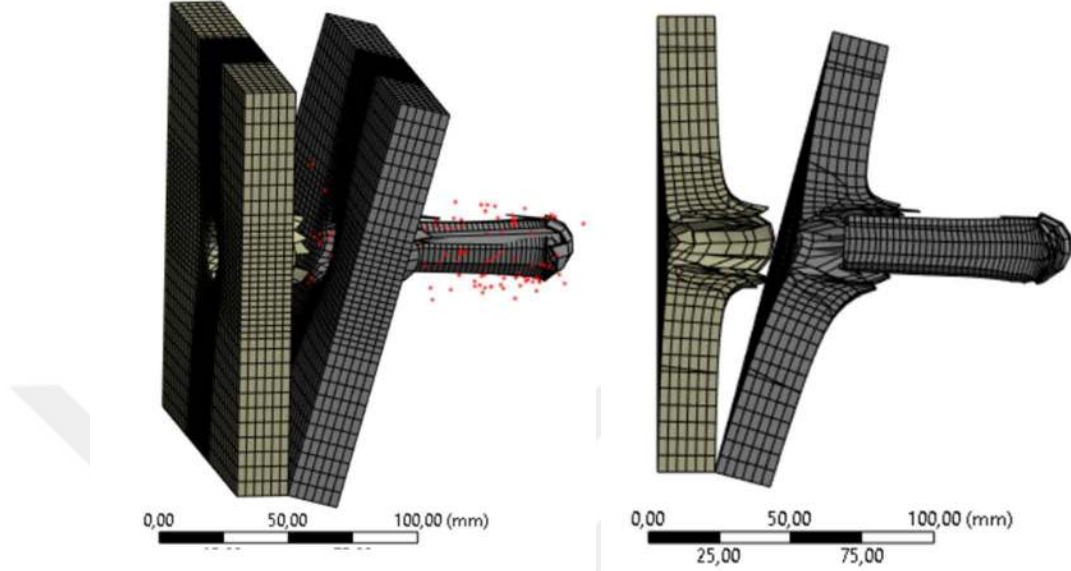
Şekil 7.74. Analiz 15 Eşdeğer Gerilme Grafiği

Analiz sonucu çıkan plastik şekil değişimi değerleri ve renklendirmeleri ile birlikte yukarıdaki Şekil 7.74’de verilmiştir.



Şekil 7.75. Analiz 15 Hız Probu Grafiği

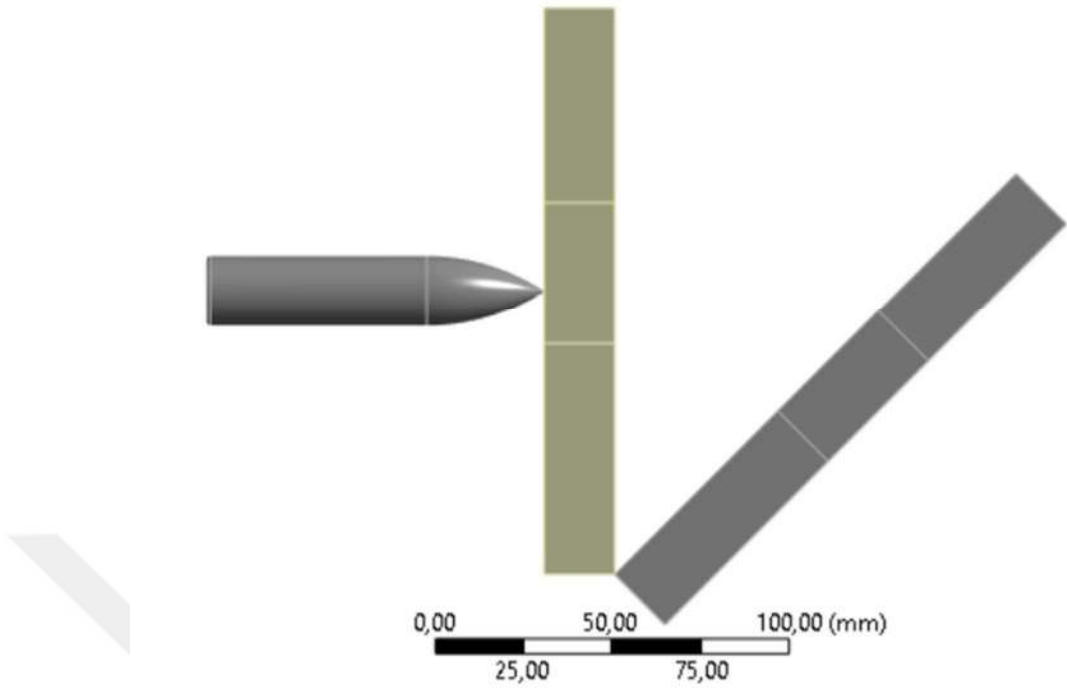
Hız değişim grafiği şekil 7.75’de verilmiştir. Aşağıda verilen şekil 7.76’dan de anlaşılacağı gibi mermi 850 m/s hızında 17522 rad/s dđnme dđnme ile 20mm kalınlığındaki aralarında 30° açı bulunan iki adet zırhı delmiştir.



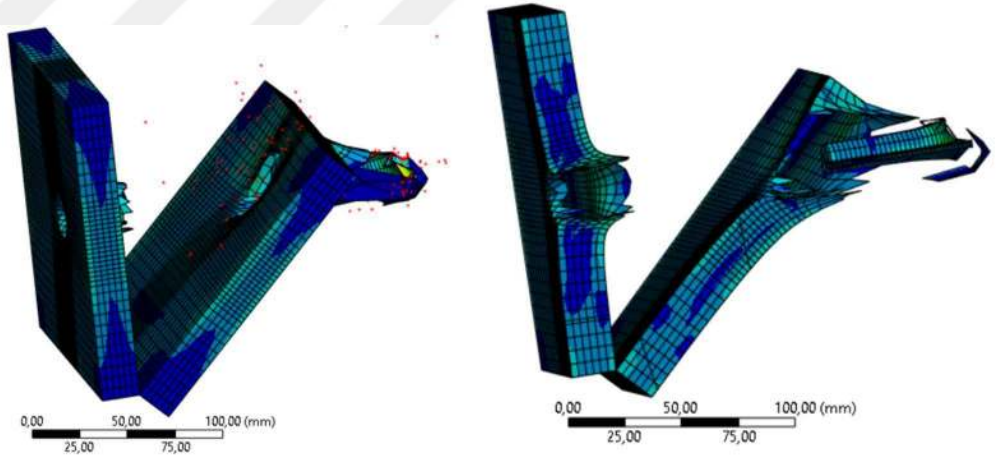
şekil 7.76. Analiz 15 Hız Probu Dağılımları

Analiz 16

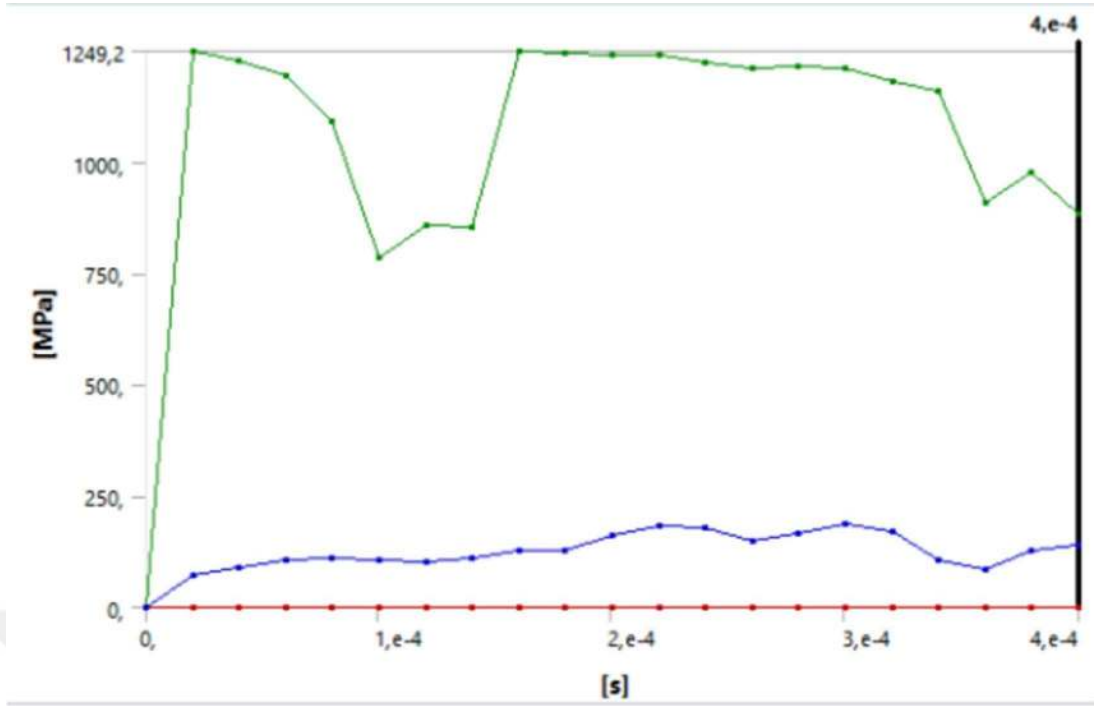
Aralarında 45° açı bulunan iki adet zırhın performansını test etmek için, ogive uçlu bir mermi kullanılarak 20mm (20+20m) kalınlığında Al5083-H116 malzemeden yapılmış zırh tasarlandı. Test, 22°C ortam sıcaklığında gerekleşmiş olup, mermi 850 m/s hızla ateşlendi ve 17522 rad/s dđnüşle zırha arptı. Ancak, zırh mermiyi durduramadı ve merminin zırhı terk etme hızı 290,9 m/s olarak ۆlüldü.



Şekil 7.77. Analiz 16 Katı Modeli

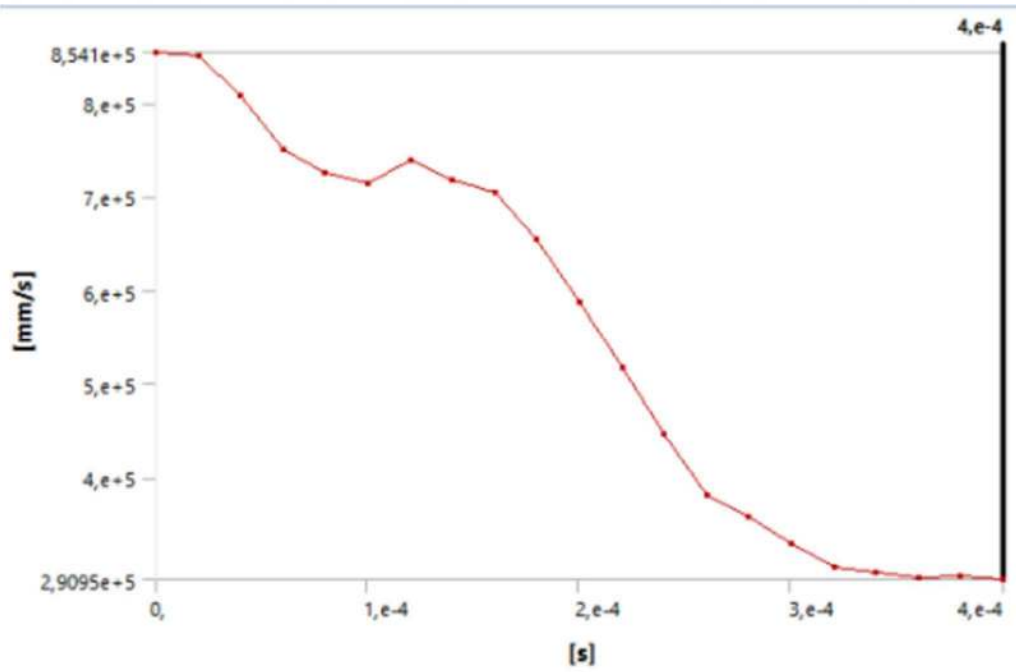


Şekil 7.78. Analiz 16 Eşdeğer Gerilme Dağılımları



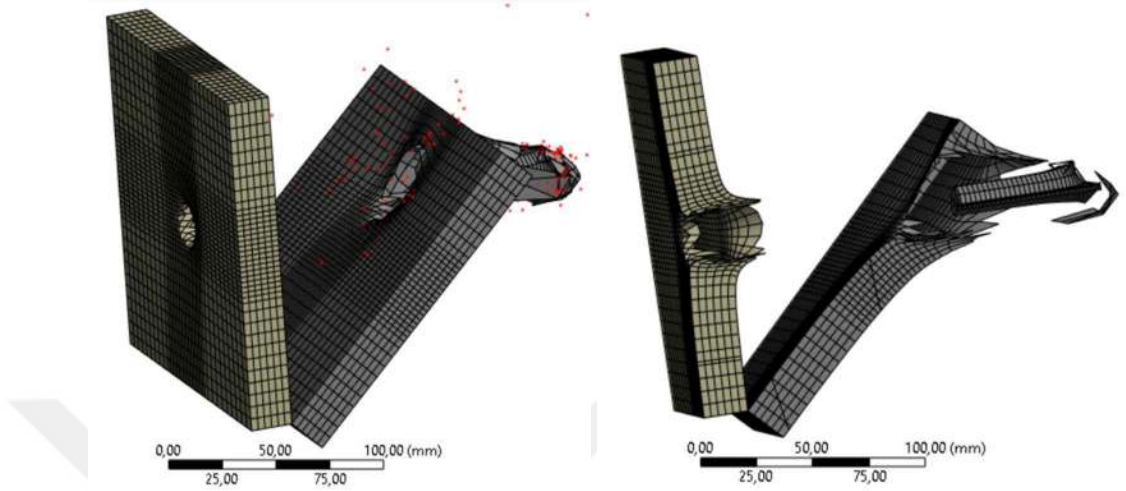
Şekil 7.79. Analiz 16 Eşdeğer Gerilme Grafiği

Analiz sonucu çıkan plastik şekil değişimi değerleri ve renklendirmeleri ile birlikte yukarıdaki Şekil 7.79’de verilmiştir.



Şekil 7.80. Analiz 16 Hız Probu Grafiği

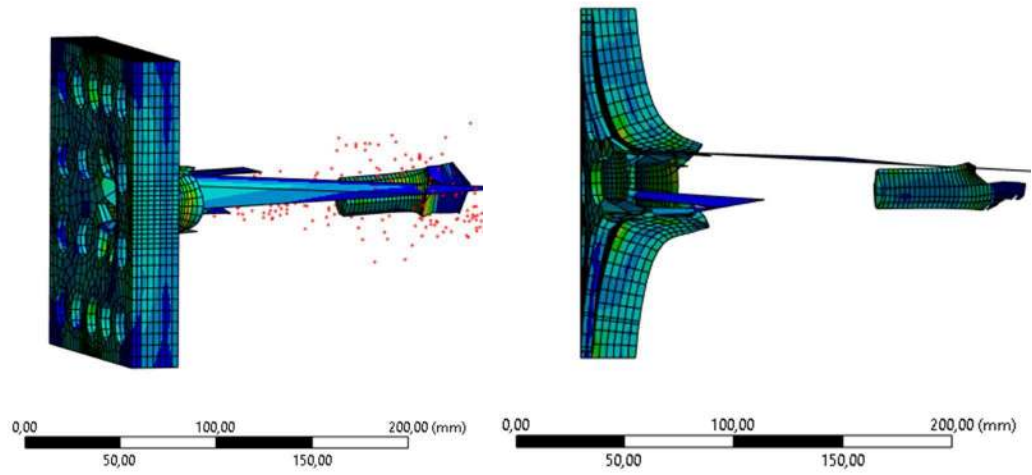
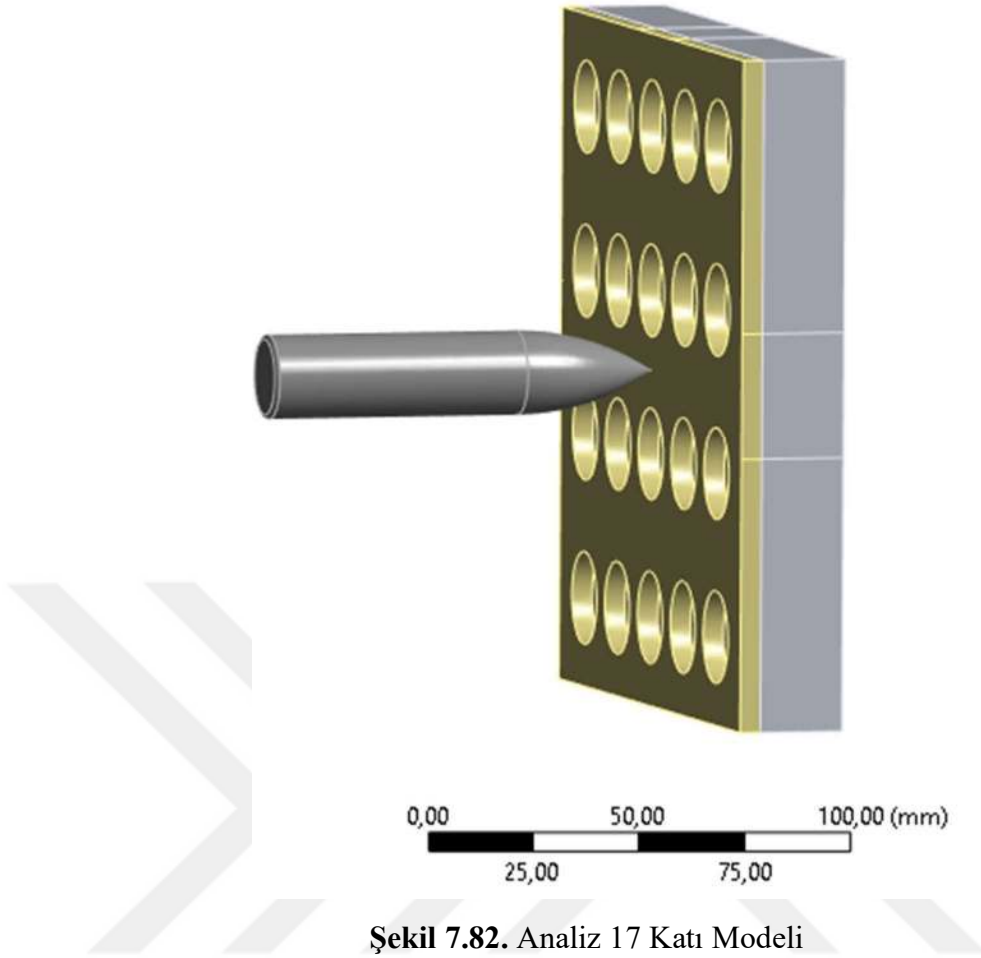
Hız değişim grafiği şekil 7.80’de verilmiştir. Aşağıda verilen şekil 7.81’den de anlaşılacağı gibi mermi 850 m/s hızında 17522 rad/s dđnme dđnme ile 20mm kalınlığındaki aralarında 45° açı bulunan iki adet zırhı delmiştir.



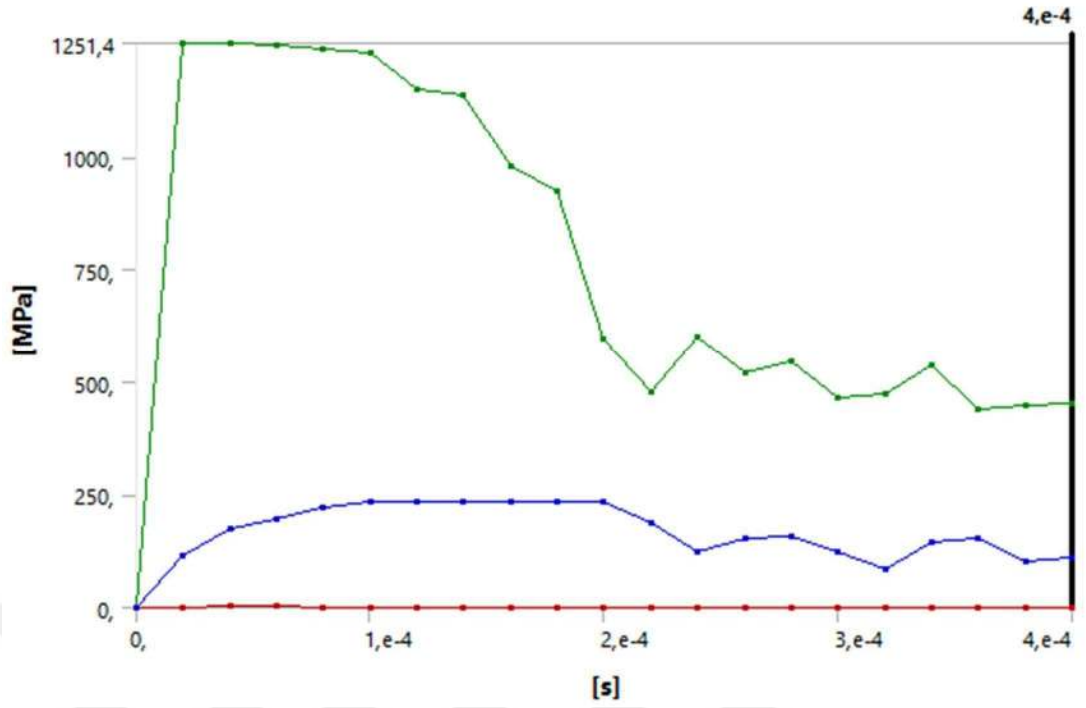
şekil 7.81. Analiz 16 Hız Probu Dağılımları

Analiz 17

Ogive uçlu mermi kullanarak, birincisi 5mm kalınlığında delikli, ikincisi 20mm kalınlığında dđz plaka şeklinde olan zırhın performansını test etmek için Al5083-H116 malzemeden yapılmış zırh tasarlandı. Test, 22°C ortam sıcaklığında geręekleřmiř olup, mermi 850 m/s hızla ateşlendi ve 17522 rad/s dđnüşle zırha ęarptı. Ancak, zırh mermiyi durduramadı ve merminin zırhı terk etme hızı 511,3 m/s olarak dđlęüldü.

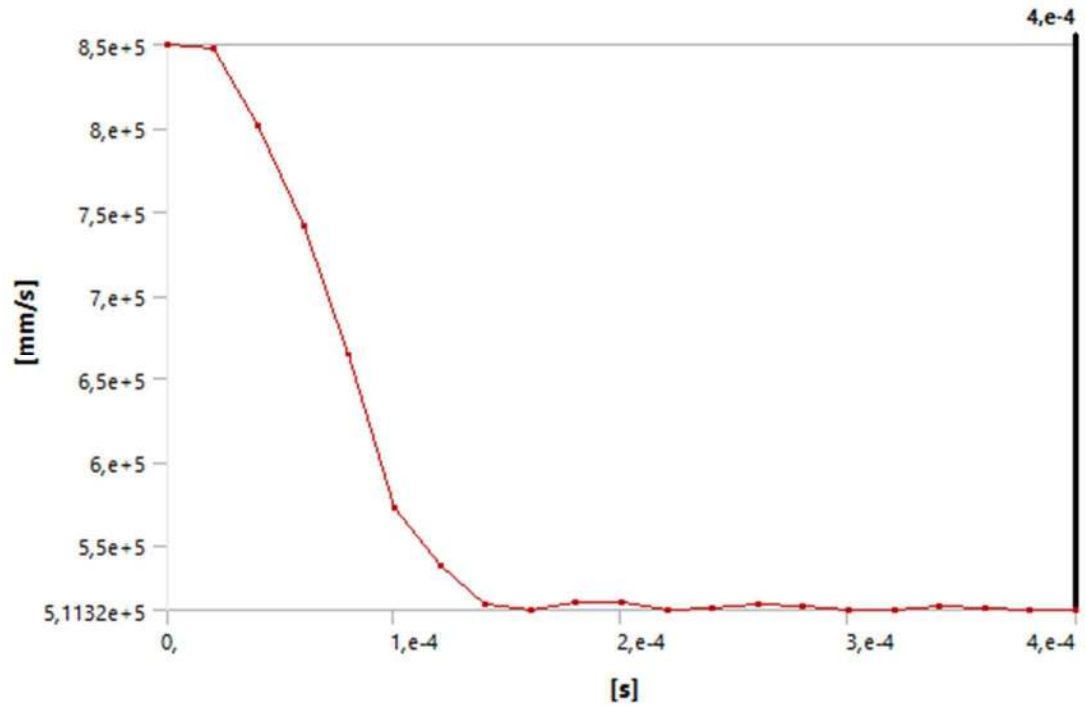


Şekil 7.83. Analiz 17 Eşdeğer Gerilme Dağılımları



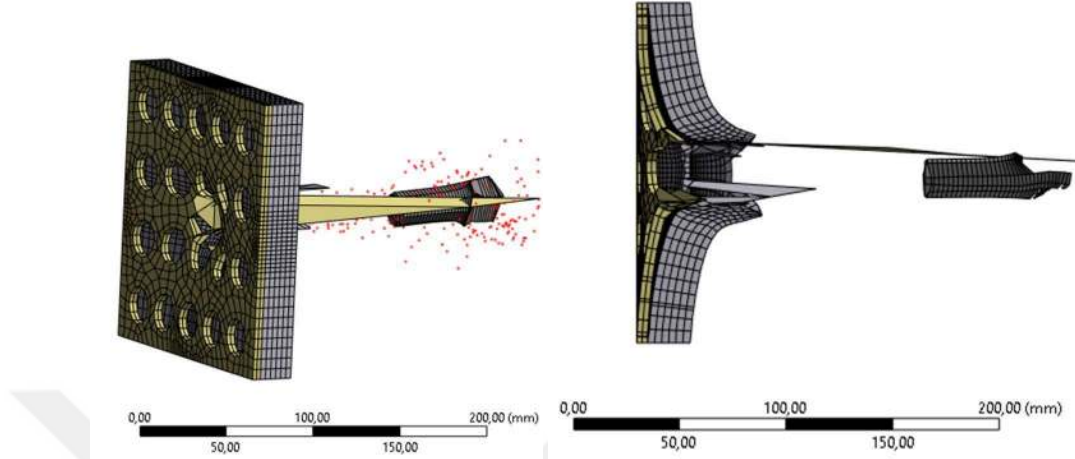
Şekil 7.84. Analiz 17 Eşdeğer Gerilme Grafiği

Analiz sonucu çıkan plastik şekil değişimi değerleri ve renklendirmeleri ile birlikte yukarıdaki Şekil 7.84’de verilmiştir.



Şekil 7.85. Analiz 17 Hız Probu Grafiği

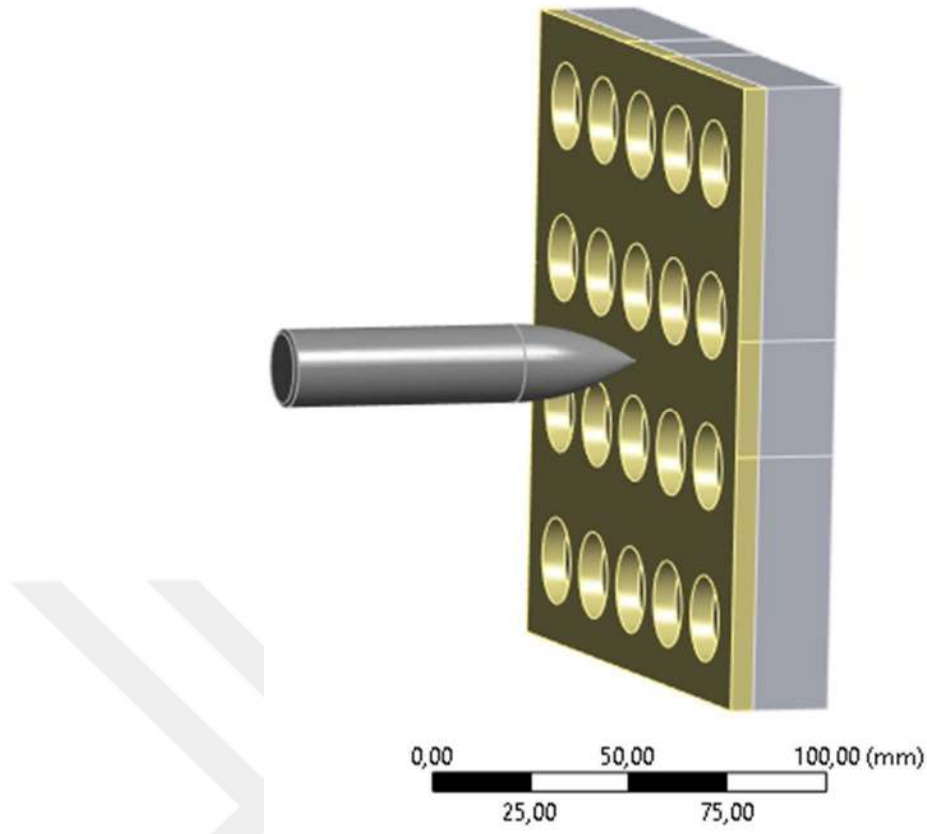
Hız değişim grafiği şekil 7.85’de verilmiştir. Aşağıda verilen şekil 7.86’dan de anlaşılacağı gibi mermi 850 m/s hızında 17522 rad/s dönme ile birinci 5 mm delikli levha, ikicisi 20mm kalınlığında düz levha olan iki adet zırhı delerek gemiştir.



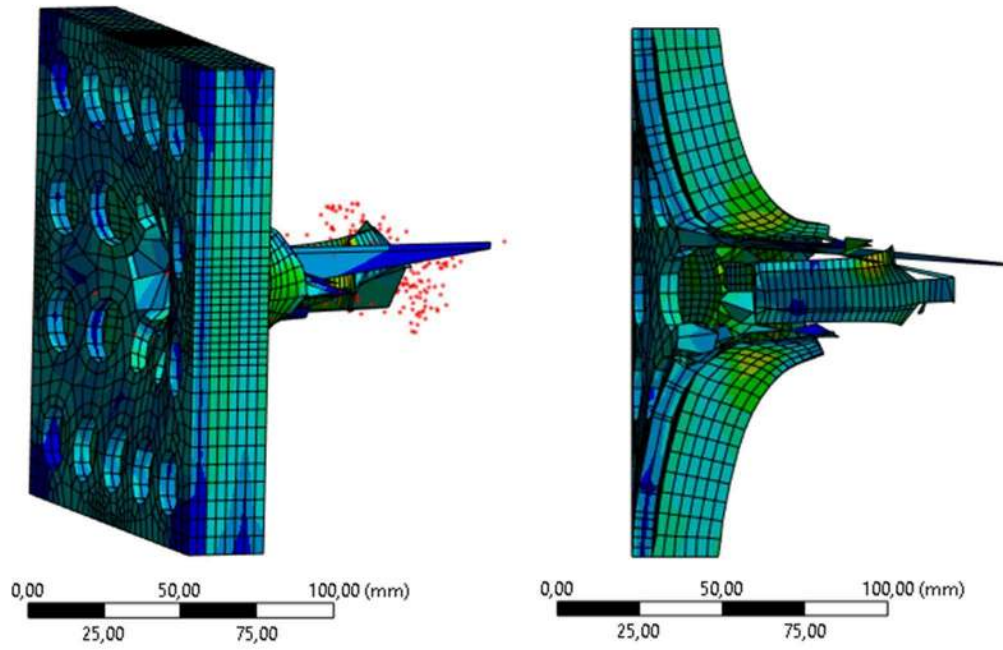
şekil 7.86. Analiz 17 Hız Probu Dağılımları

Analiz 18

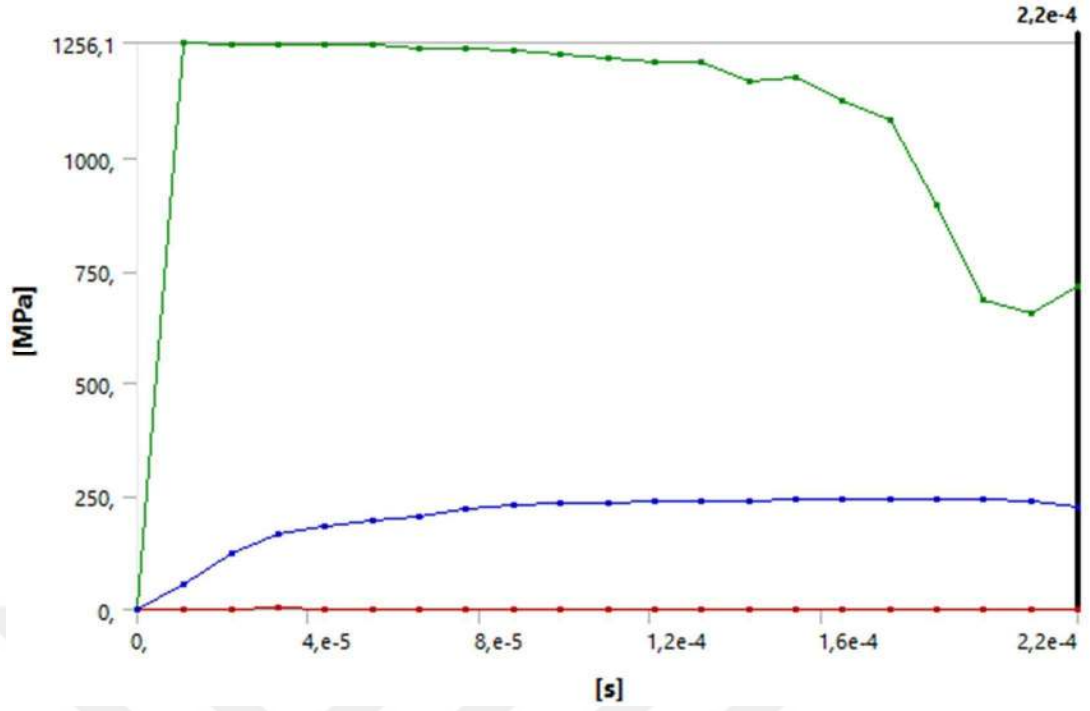
Ogive ulu mermi kullanarak, birincisi 6 mm kalınlığında delikli, ikincisi 20mm kalınlığında düz plaka şeklinde olan zırhın performansını test etmek için Al5083-H116 malzemeden yapılmış zırh tasarlandı. Test, 22°C ortam sıcaklığında gerekleşmiş olup, mermi 850 m/s hızla ateşlendi ve 17522 rad/s dnüşle zırha arptı. Ancak, zırh mermiyi durduramadı ve merminin zırhı terk etme hızı 448,4 m/s olarak ölçüldü.



Şekil 7.87. Analiz 18 Katı Modeli

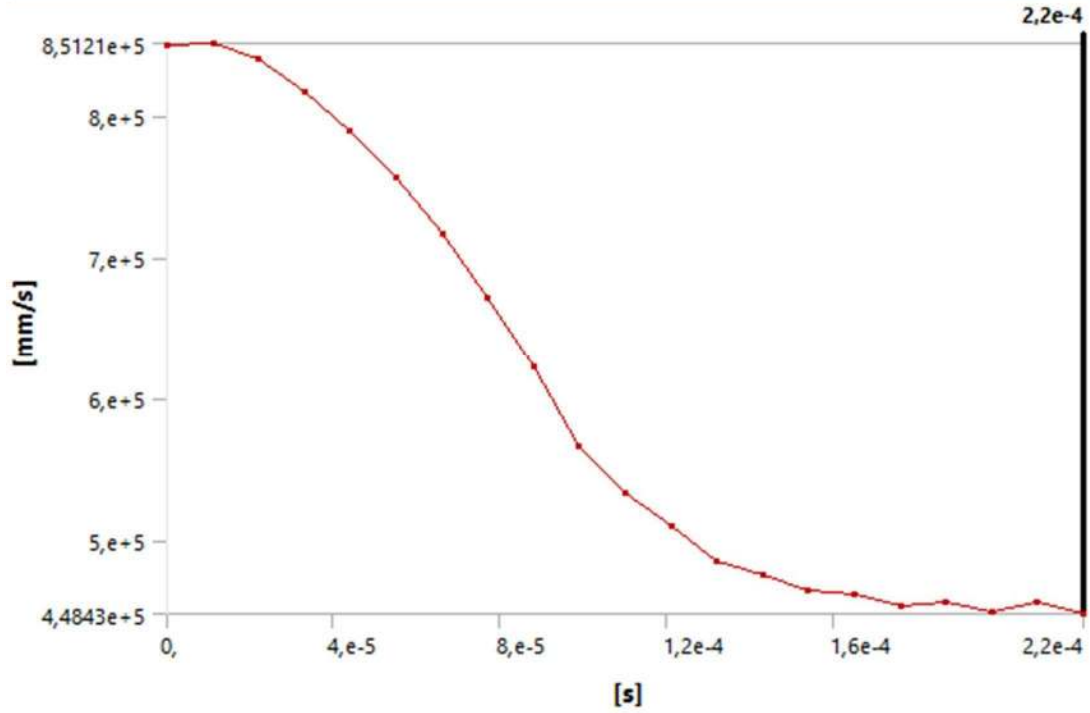


Şekil 7.88. Analiz 18 Eşdeğer Gerilme Dağılımları



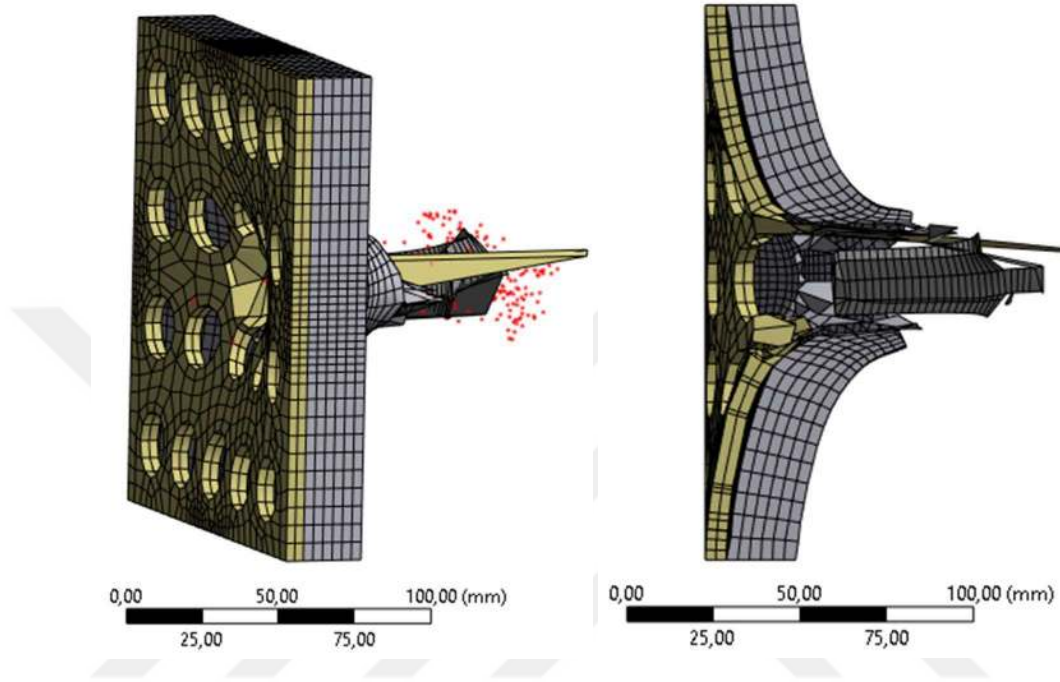
Şekil 7.89. Analiz 18 Eşdeğer Gerilme Grafiği

Analiz sonucu çıkan plastik şekil değişimi değerleri ve renklendirmeleri ile birlikte yukarıdaki Şekil 7.89 verilmiştir.



Şekil 7.90. Analiz 18 Hız Probu Grafiği

Hız değişim grafiği şekil 7.90’de verilmiştir. Aşağıda verilen şekil 7.91’den de anlaşılacağı gibi mermi 850 m/s hızında 17522 rad/s dönme ile birinci 6 mm delikli levha, ikicisi 20mm kalınlığında düz levha olan iki adet zırhı delerek gemiştir.



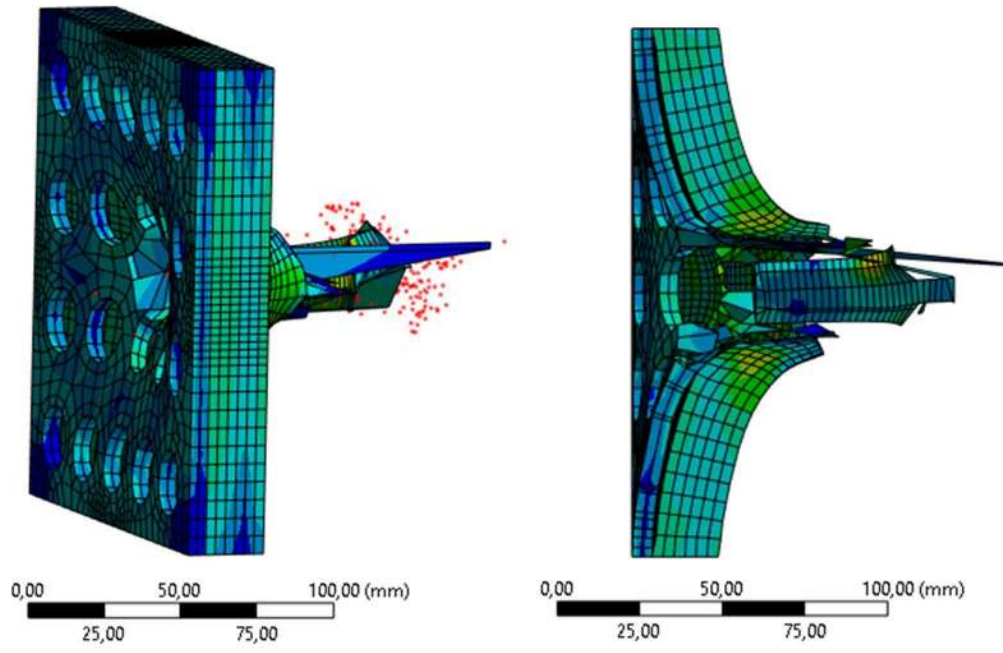
şekil 7.91. Analiz 18 Hız Probu Dağılımları

Analiz 19

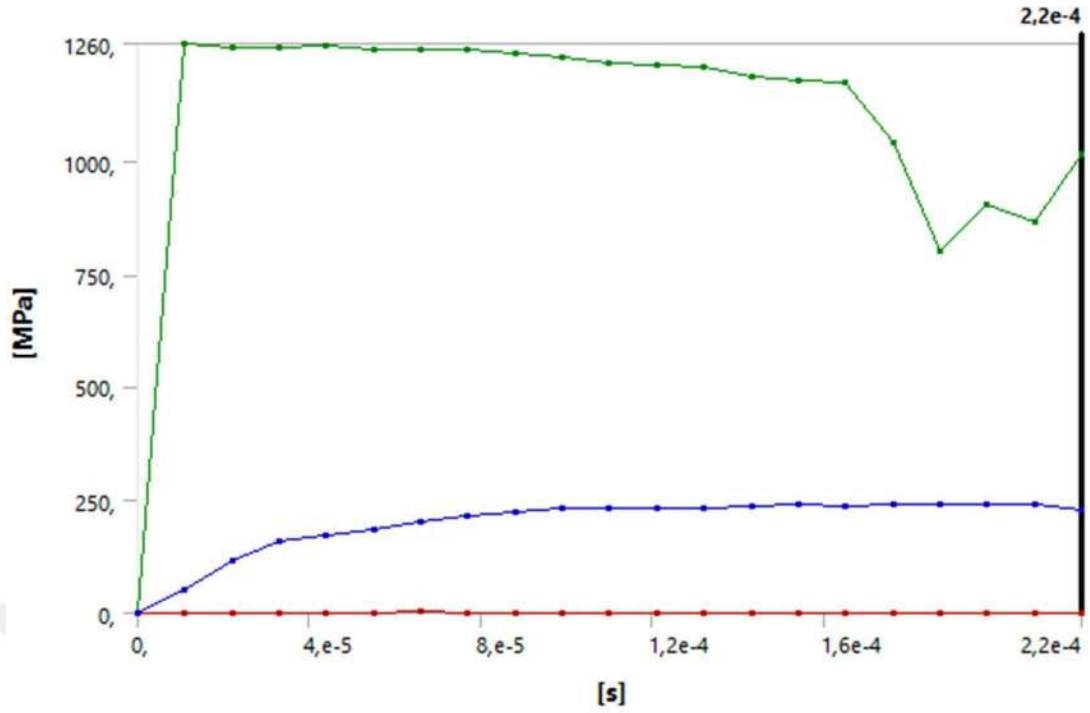
Ogive ulu mermi kullanarak, birincisi 6 mm kalınlığında delikli, ikincisi 20mm kalınlığında düz plaka şeklinde olan zırhın performansını test etmek için Al5083-H116 malzemeden yapılmış zırh tasarlandı. Test, 22°C ortam sıcaklığında gerekleşmiş olup, mermi 850 m/s hızla ateşlendi ve 17522 rad/s dnşle zırha arptı. Ancak, zırh mermiyi durduramadı ve merminin zırhı terk etme hızı 459,3 m/s olarak ölçüldü.



Şekil 7.92. Analiz 19 Katı Modeli

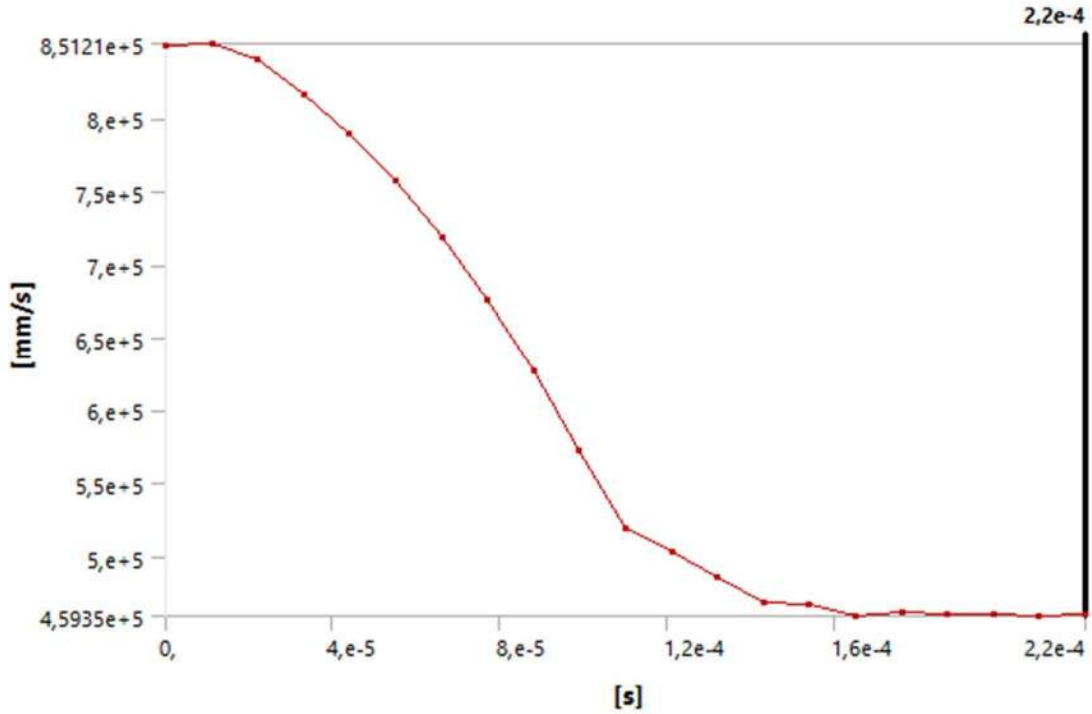


Şekil 7.93. Analiz 19 Eşdeğer Gerilme Dağılımları



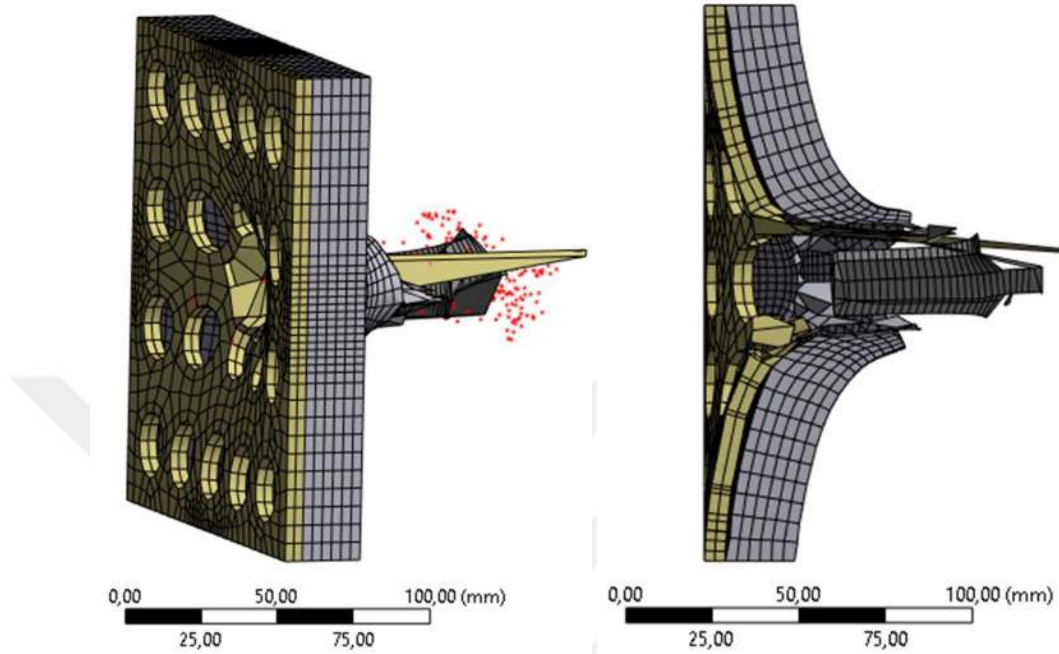
Şekil 7.94. Analiz 19 Eşdeğer Gerilme Grafiği

Analiz sonucu çıkan plastik şekil değişimi değerleri ve renklendirmeleri ile birlikte yukarıdaki Şekil 7.94’de verilmiştir.



Şekil 7.95. Analiz 19 Hız Probu Grafiği

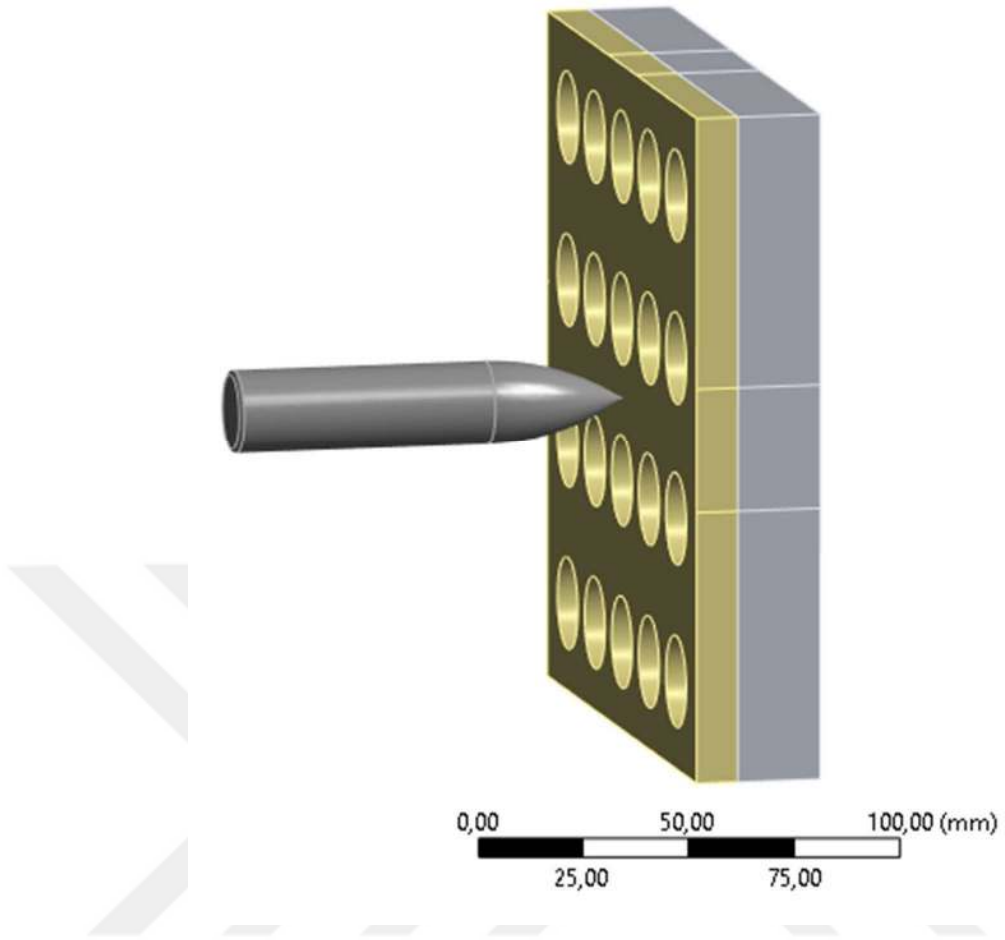
Hız değişim grafiği şekil 7.95’de verilmiştir. Aşağıda verilen şekil 7.96’dan de anlaşılacağı gibi mermi 850 m/s hızında 17522 rad/s dönme ile birinci 7 mm delikli levha, ikicisi 20mm kalınlığında düz levha olan iki adet zırhı delerek gemiştir.



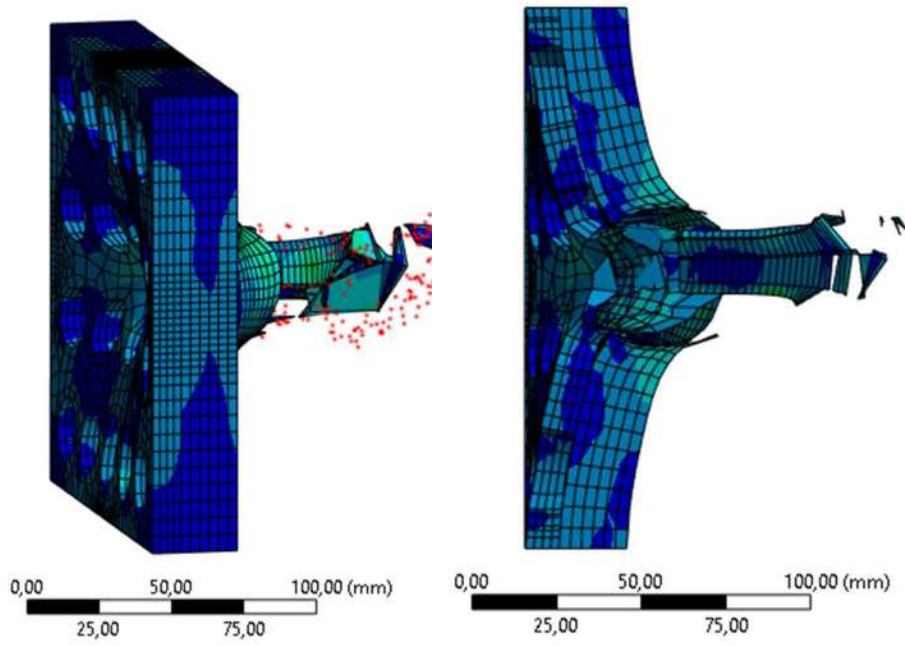
şekil 7.96. Analiz 19 Hız Probu Dağılımları

Analiz 20

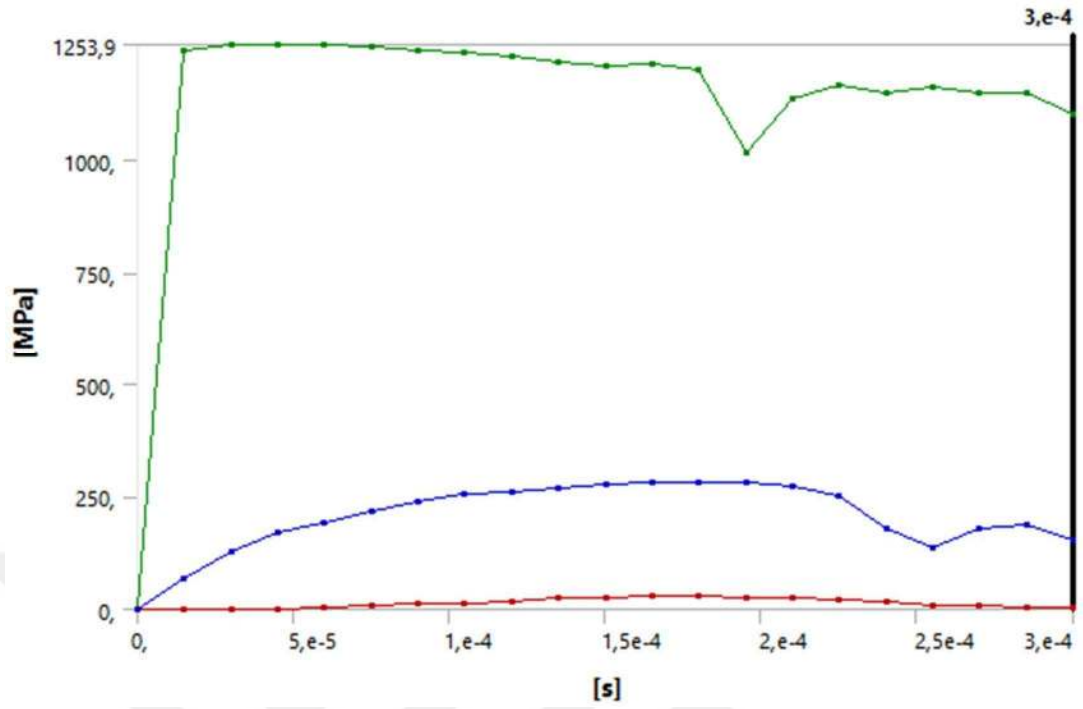
Ogive ulu mermi kullanarak, birincisi 10 mm kalınlığında delikli, ikincisi 20mm kalınlığında düz plaka şeklinde olan zırhın performansını test etmek için Al5083-H116 malzemeden yapılmış zırh tasarlandı. Test, 22°C ortam sıcaklığında gerekleşmiş olup, mermi 850 m/s hızla ateşlendi ve 17522 rad/s dnüşle zırha arptı. Ancak, zırh mermiyi durduramadı ve merminin zırhı terk etme hızı 265,5 m/s olarak ölçüldü.



Şekil 7.97. Analiz 20 Katı Modeli

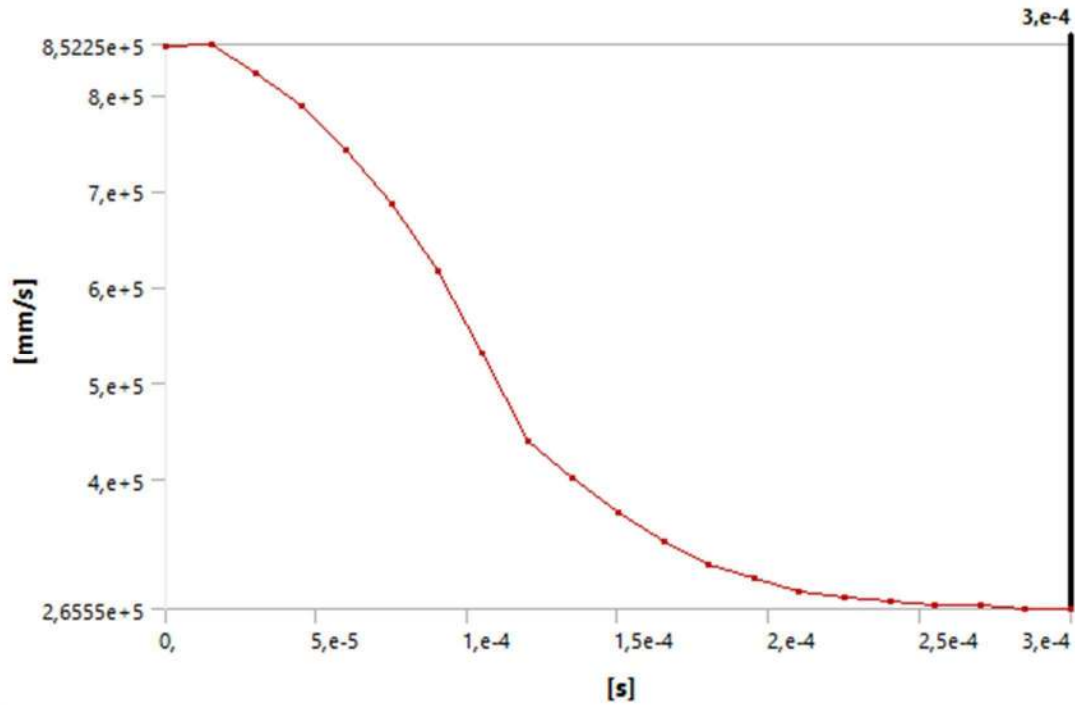


Şekil 7.98. Analiz 20 Eşdeğer Gerilme Dağılımları



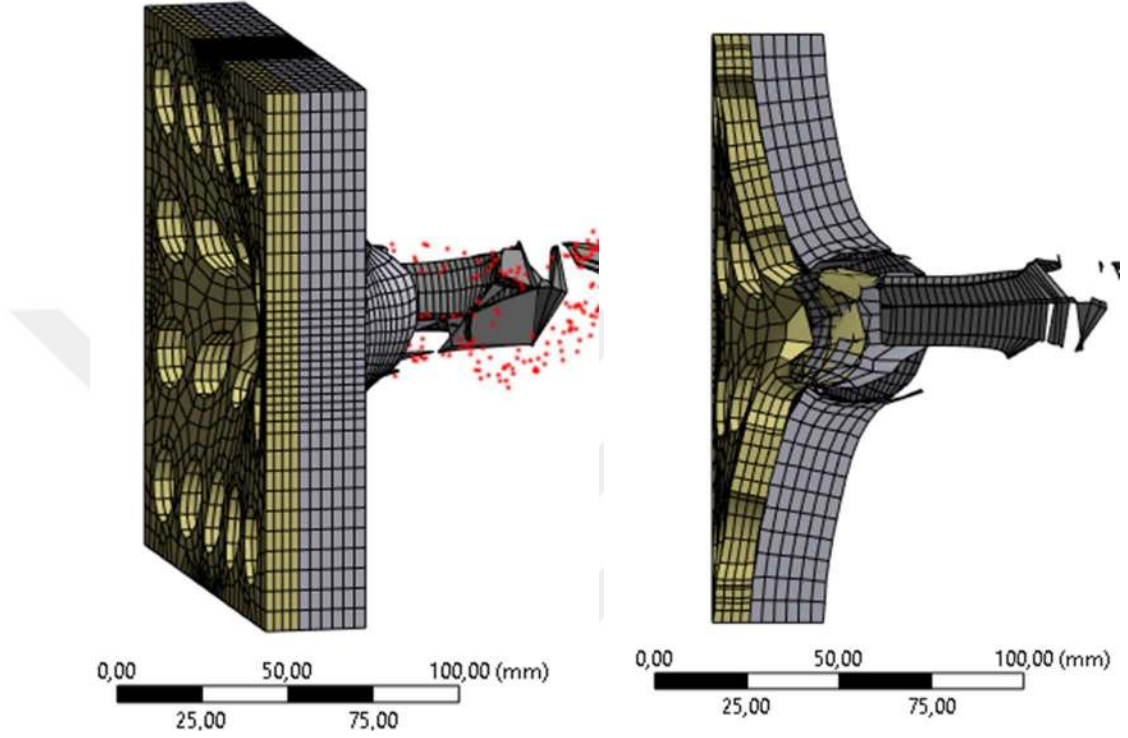
Şekil 7.99. Analiz 20 Eşdeğer Gerilme Grafiği

Analiz sonucu çıkan plastik şekil değişimi değerleri ve renklendirmeleri ile birlikte yukarıdaki Şekil 7.99’de verilmiştir.



Şekil 7.100. Analiz 20 Hız Probu Grafiği

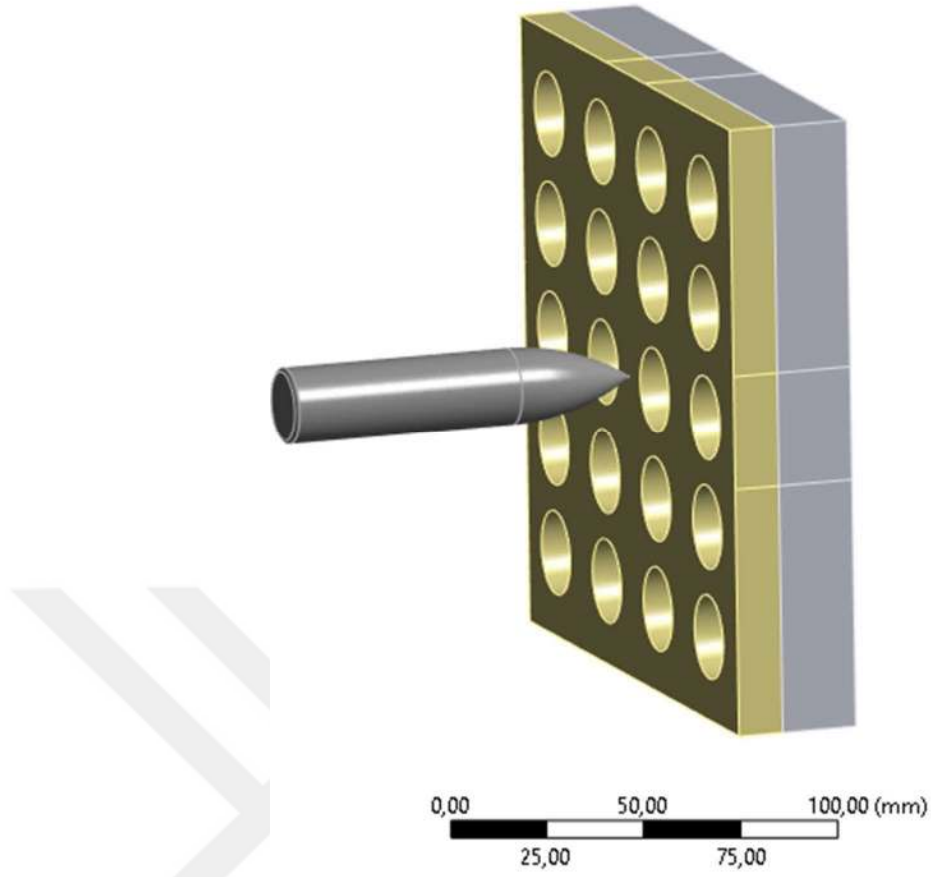
Hız değişim grafiği şekil 7.100’de verilmiştir. Aşağıda verilen şekil 7.101’den de anlaşılacağı gibi mermi 850 m/s hızında 17522 rad/s dönme ile birinci 10 mm delikli levha, ikicisi 20mm kalınlığında düz levha olan iki adet zırhı delerek gemiştir.



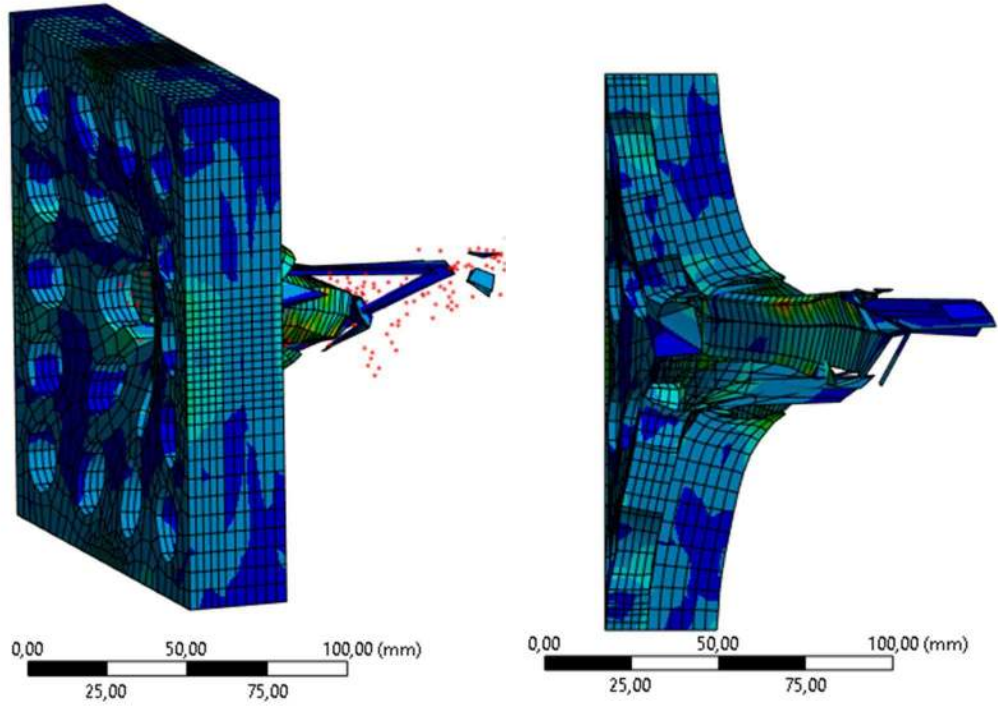
şekil 7.101. Analiz 20 Hız Probu Dağılımları

Analiz 21

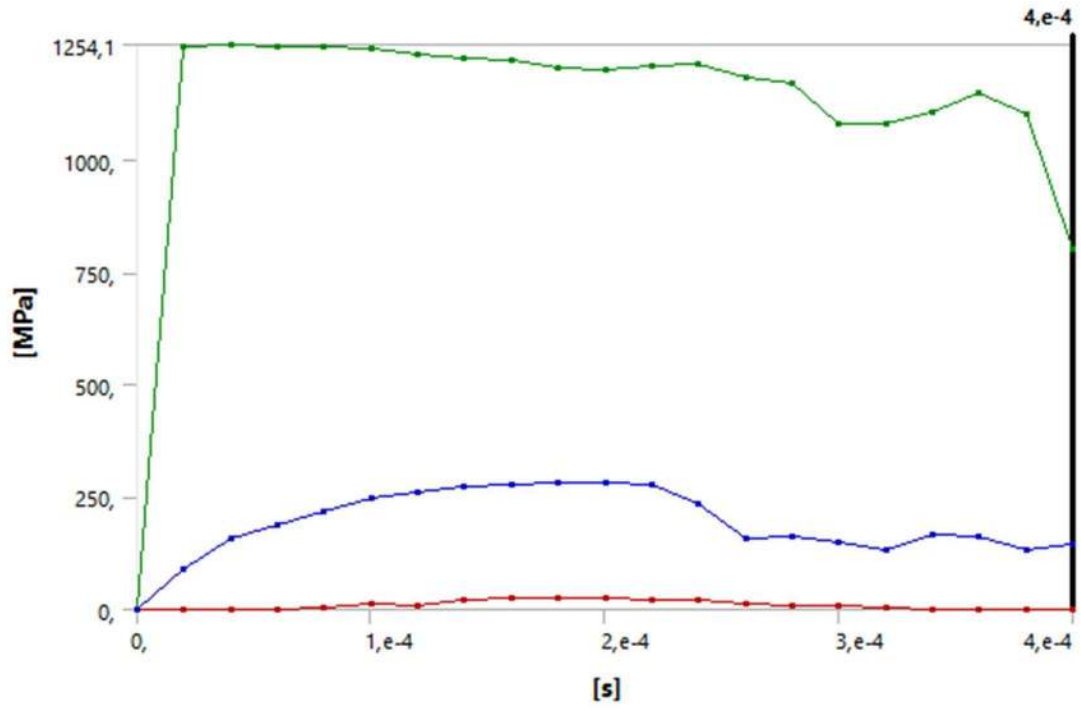
Ogive ulu mermi kullanarak, birincisi 12 mm kalınlığında delikli, ikincisi 20mm kalınlığında düz plaka şeklinde olan zırhın performansını test etmek için Al5083-H116 malzemeden yapılmış zırh tasarlandı. Test, 22°C ortam sıcaklığında gerekleşmiş olup, mermi 850 m/s hızla ateşlendi ve 17522 rad/s dnüşle zırha arptı. Ancak, zırh mermiyi durduramadı ve merminin zırhı terk etme hızı 13,55 m/s olarak ölçüldü.



Şekil 7.102. Analiz 21 Katı Modeli

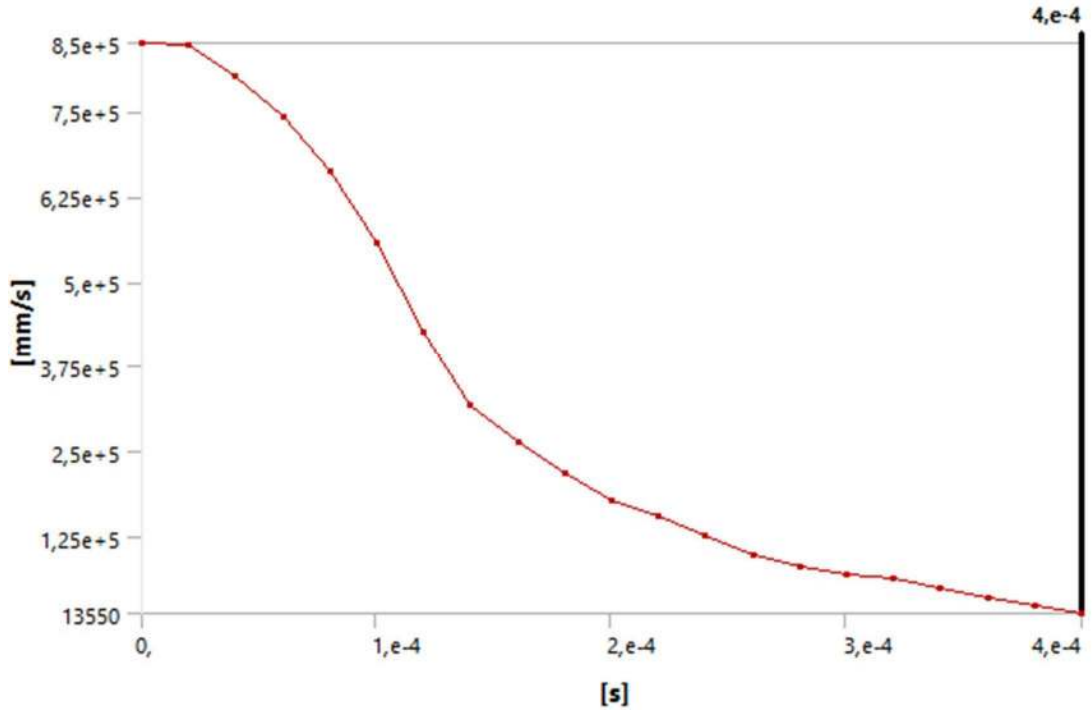


Şekil 7.103. Analiz 21 Eşdeğer Gerilme Dağılımları



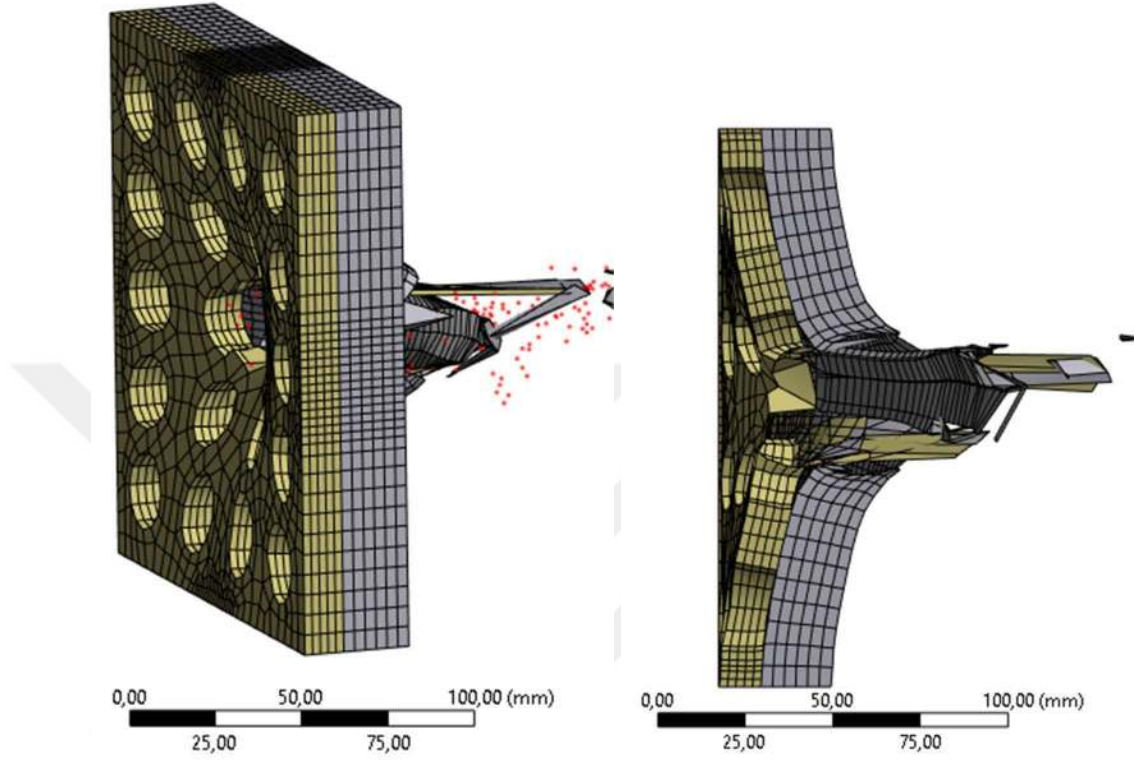
Şekil 7.104. Analiz 21 Eşdeğer Gerilme Grafiği

Analiz sonucu çıkan plastik şekil değişimi değerleri ve renklendirmeleri ile birlikte yukarıdaki Şekil 7.104’de verilmiştir.



Şekil 7.105. Analiz 21 Hız Probu Grafiği

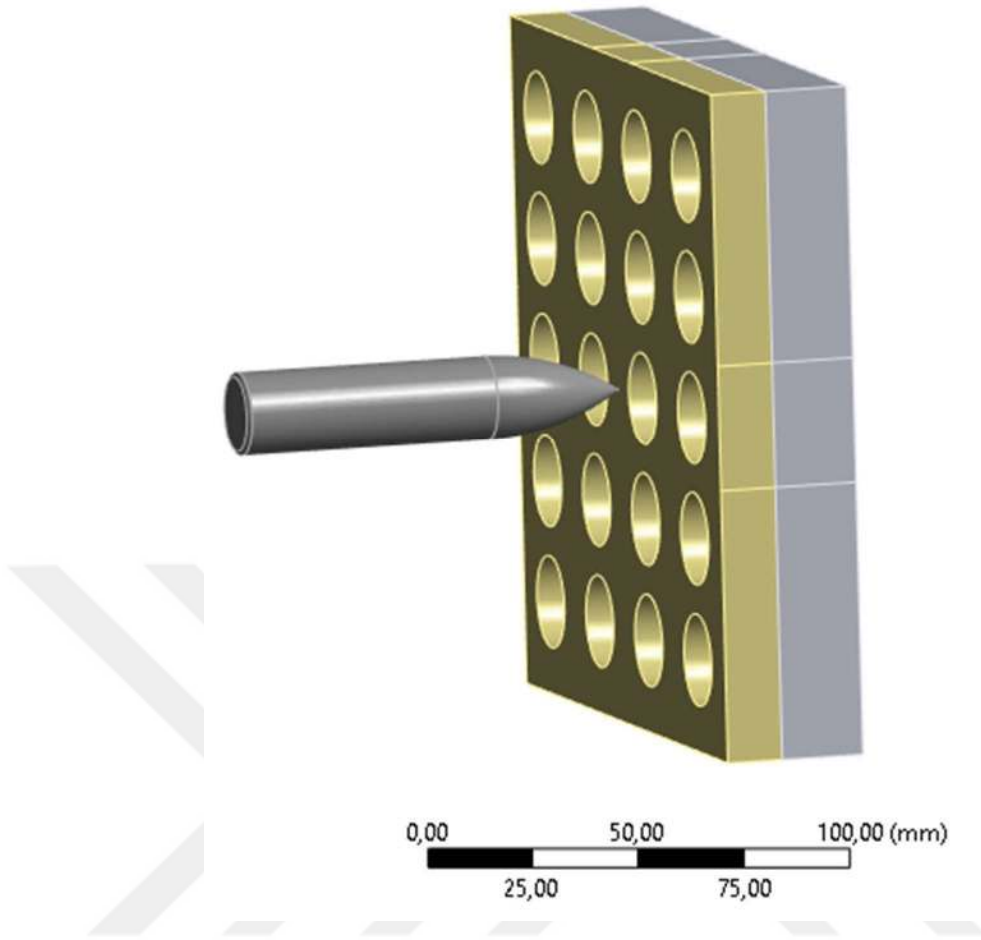
Hız değişim grafiği şekil 7.105’de verilmiştir. Aşağıda verilen şekil 7.106’den de anlaşılacağı gibi mermi 850 m/s hızında 17522 rad/s dönme ile birinci 12 mm delikli levha, ikicisi 20mm kalınlığında düz levha olan iki adet zırhı delerek gemiştir.



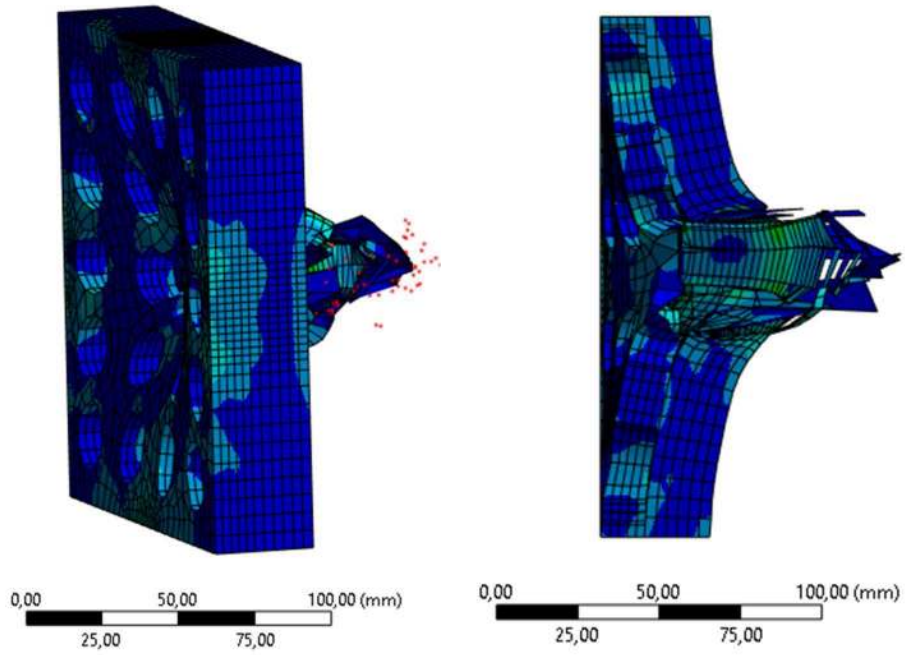
şekil 7.106. Analiz 21 Hız Probu Dağılımları

Analiz 22

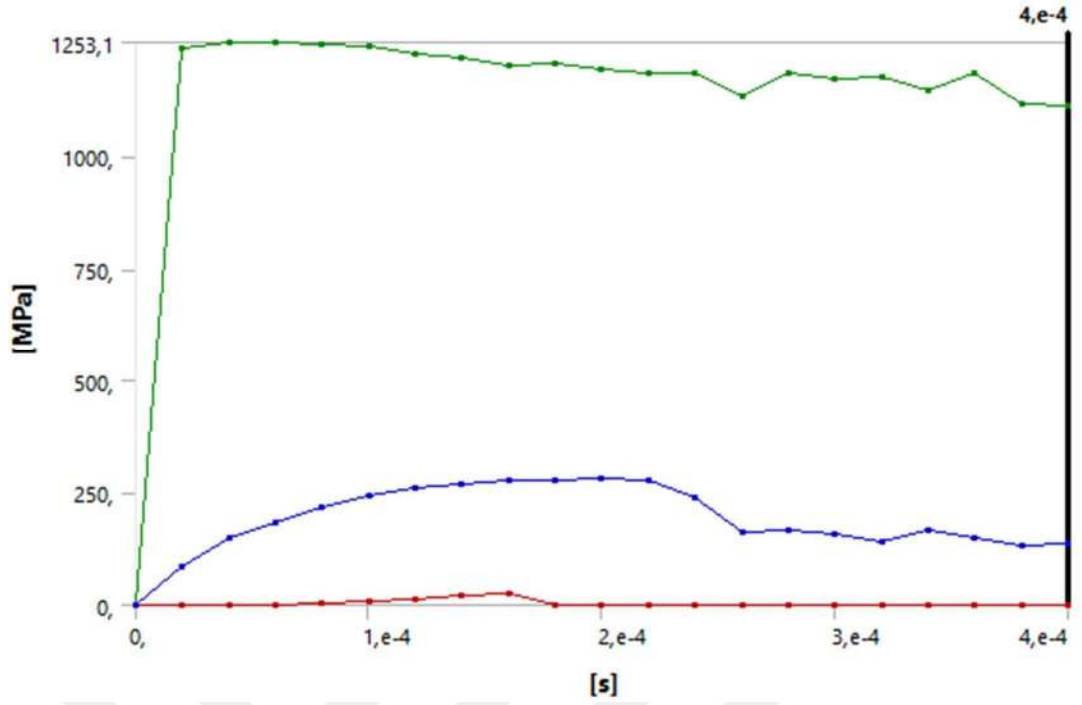
Ogive ulu mermi kullanarak, birincisi 13,5 mm kalınlığında delikli, ikincisi 20mm kalınlığında düz plaka şeklinde olan zırhın performansını test etmek için Al5083-H116 malzemeden yapılmış zırh tasarlandı. Test, 22°C ortam sıcaklığında gerekleşmiş olup, mermi 850 m/s hızla ateşlendi ve 17522 rad/s dnüşle zırha arptı. Zırhın mermiyi durdurduğu grlmüşştir.



Şekil 7.107. Analiz 22 Katı Modeli

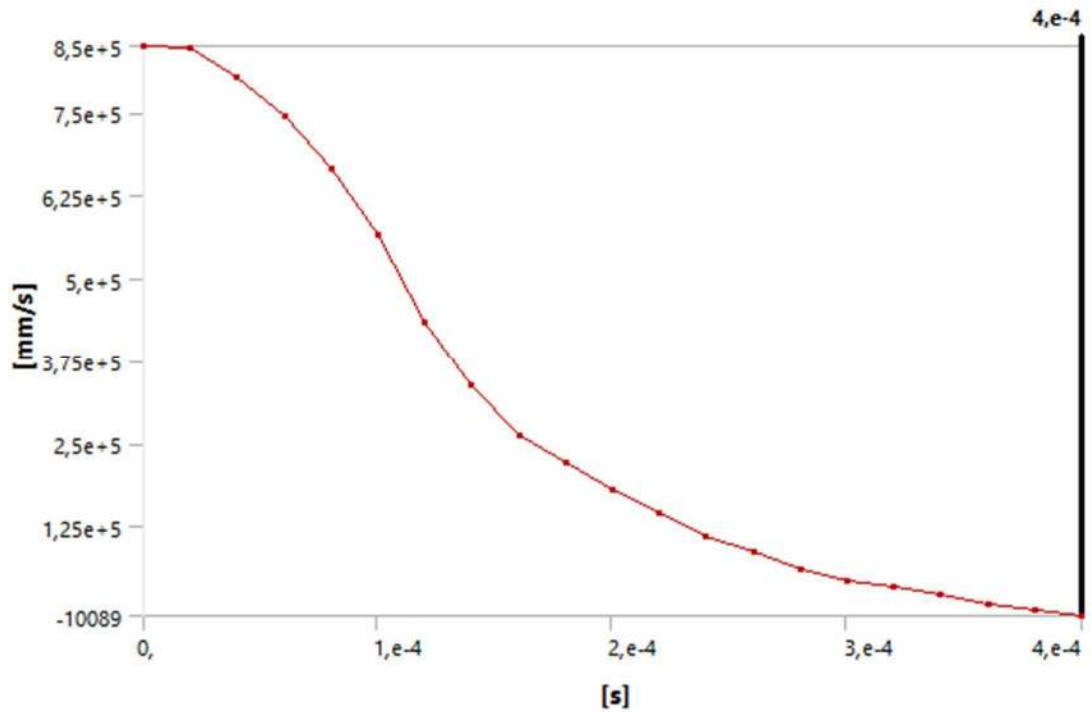


Şekil 7.108. Analiz 22 Eşdeğer Gerilme Dağılımları



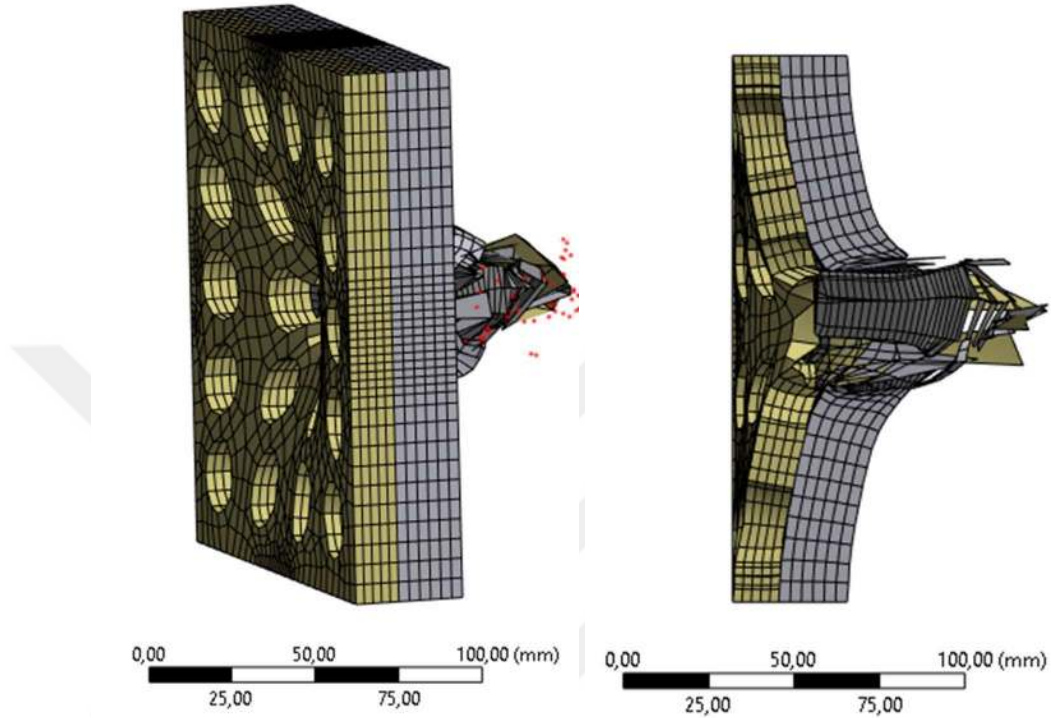
Şekil 7.109. Analiz 22 Eşdeğer Gerilme Grafiği

Analiz sonucu çıkan plastik şekil değişimi değerleri ve renklendirmeleri ile birlikte yukarıdaki Şekil 7.109’de verilmiştir.



Şekil 7.110. Analiz 22 Hız Probu Grafiği

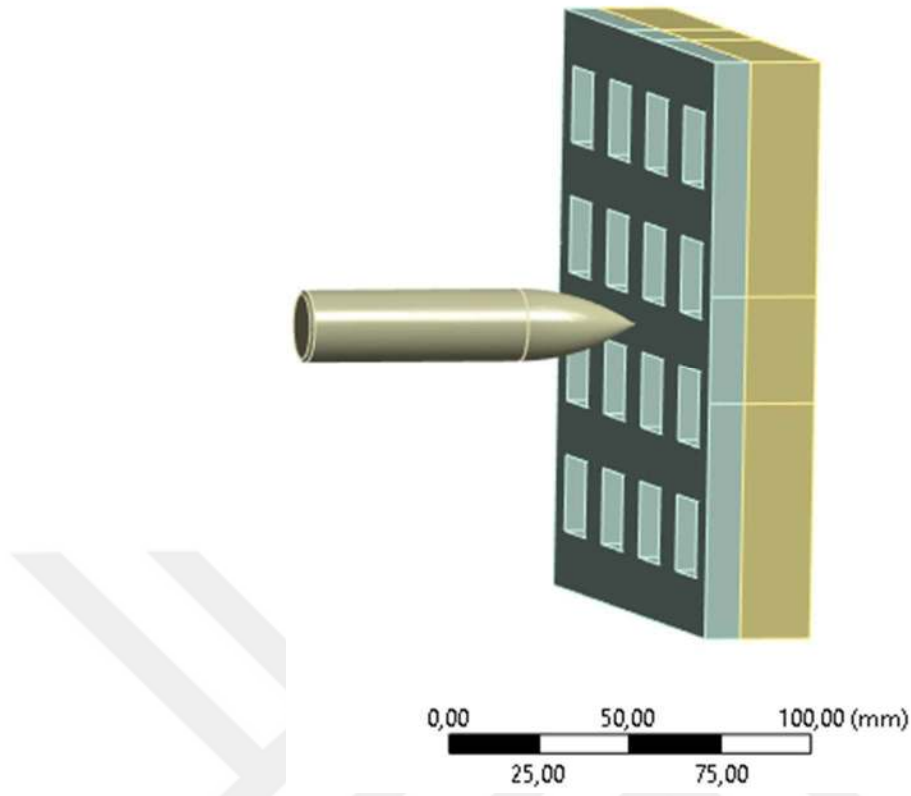
Hız değişim grafiği şekil 7.110’de verilmiştir. Aşağıda verilen şekil 7.111’den de anlaşılacağı gibi mermi 850 m/s hızında 17522 rad/s dönme ile birinci 13,5 mm delikli levha, ikicisi 20mm kalınlığında düz levha olan iki adet zırh mermiyi durdurmuştur.



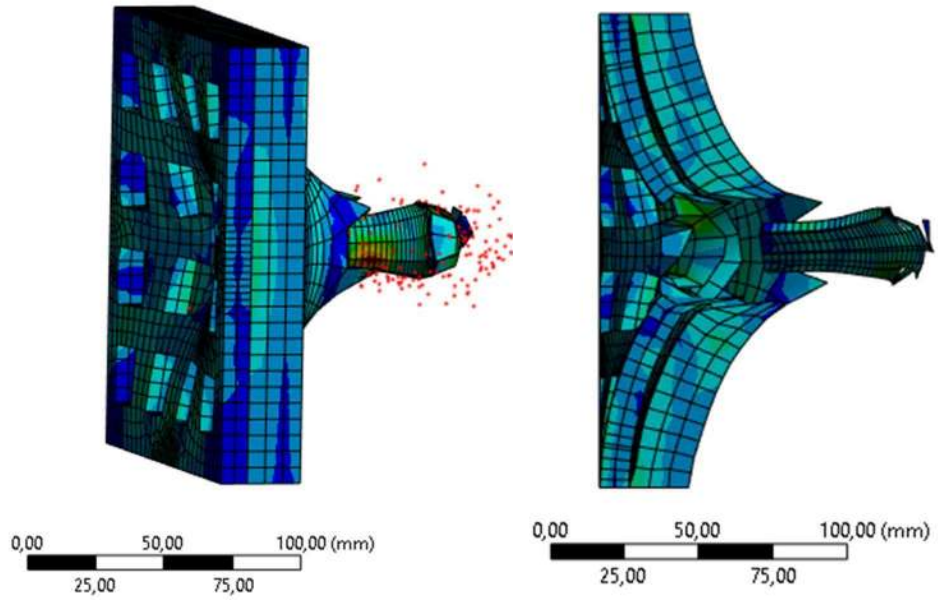
şekil 7.111. Analiz 22 Hız Probu Dağılımları

Analiz 23

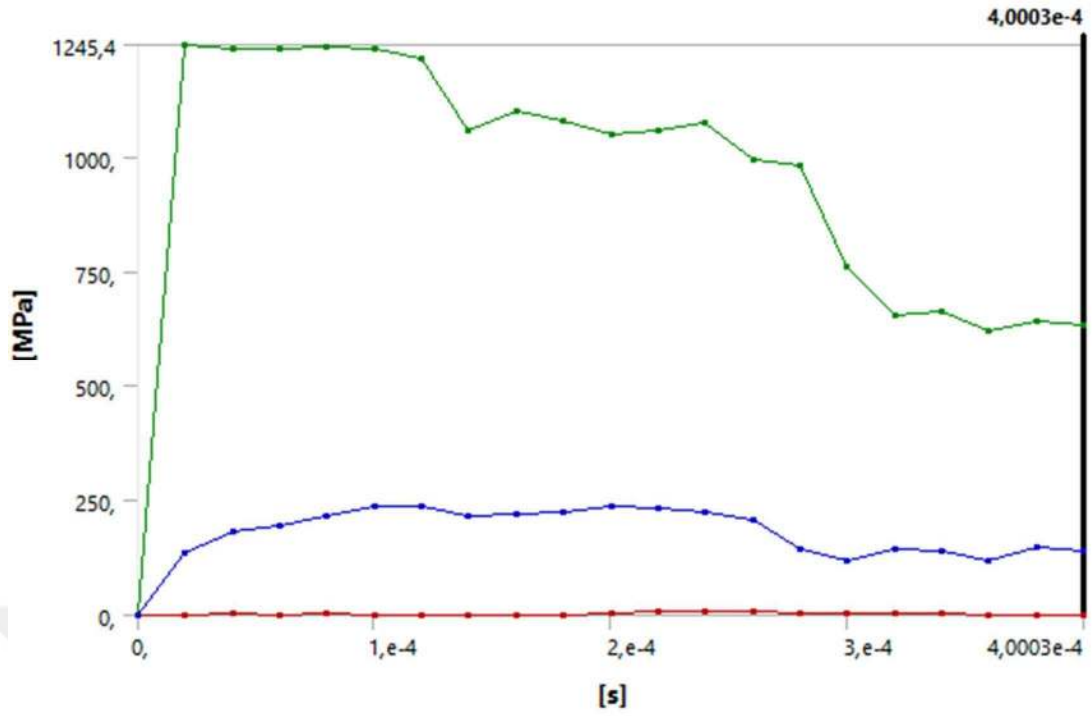
Ogive uçlu mermi kullanarak, birincisi 10 mm kalınlığında kare delikli, ikincisi 20mm kalınlığında düz plaka şeklinde olan zırhın performansını test etmek için Al5083-H116 malzemeden yapılmış zırh tasarlandı. Test, 22°C ortam sıcaklığında gerekleşmiş olup, mermi 850 m/s hızla ateşlendi ve 17522 rad/s dnüşle zırha arptı. Ancak, zırh mermiyi durduramadı ve merminin zırhı terk etme hızı 192,8 m/s olarak ölçüldü.



Şekil 7.112. Analiz 23 Katı Modeli

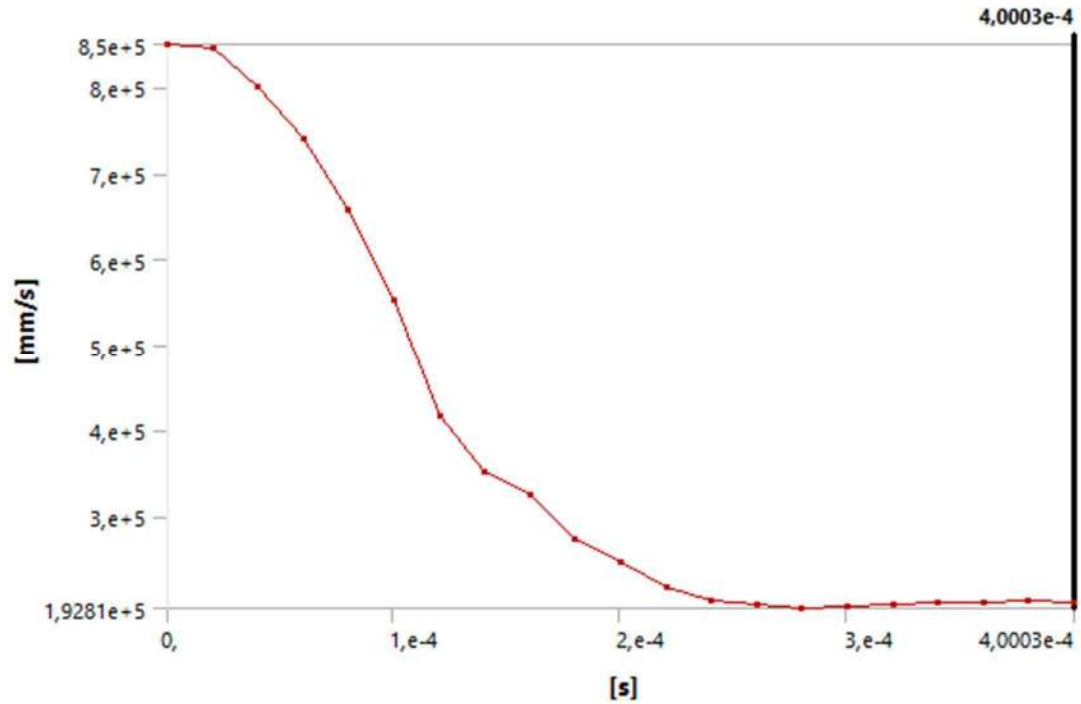


Şekil 7.113. Analiz 23 Eşdeğer Gerilme Dağılımları



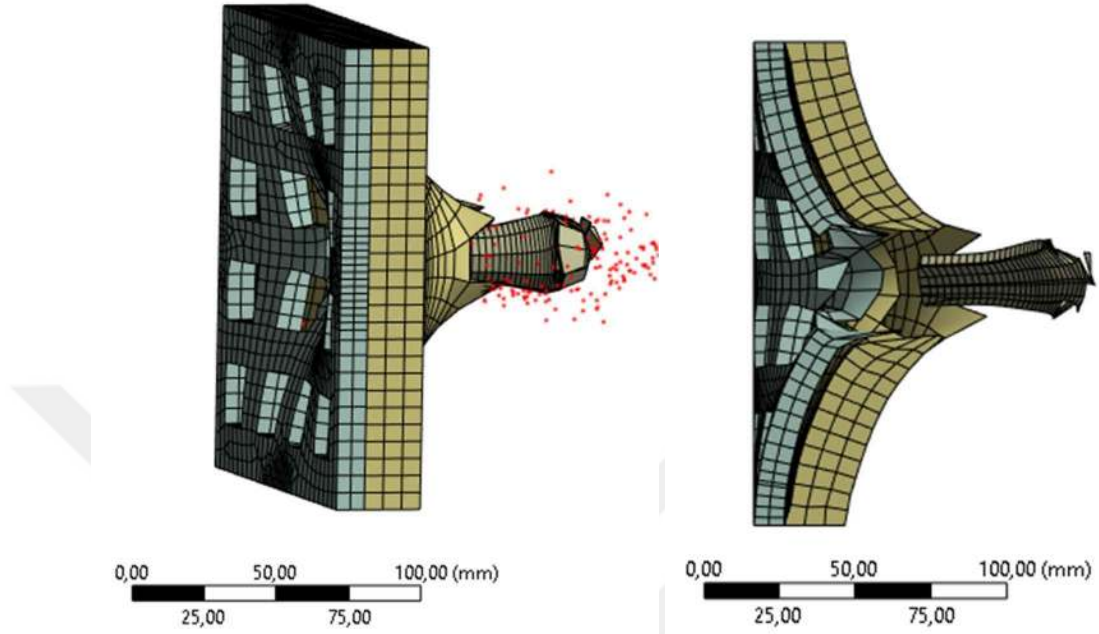
Şekil 7.114. Analiz 23 Eşdeğer Gerilme Grafiği

Analiz sonucu çıkan plastik şekil değişimi değerleri ve renklendirmeleri ile birlikte yukarıdaki Şekil 7.114’de verilmiştir.



Şekil 7.115. Analiz 23 Hız Probu Grafiği

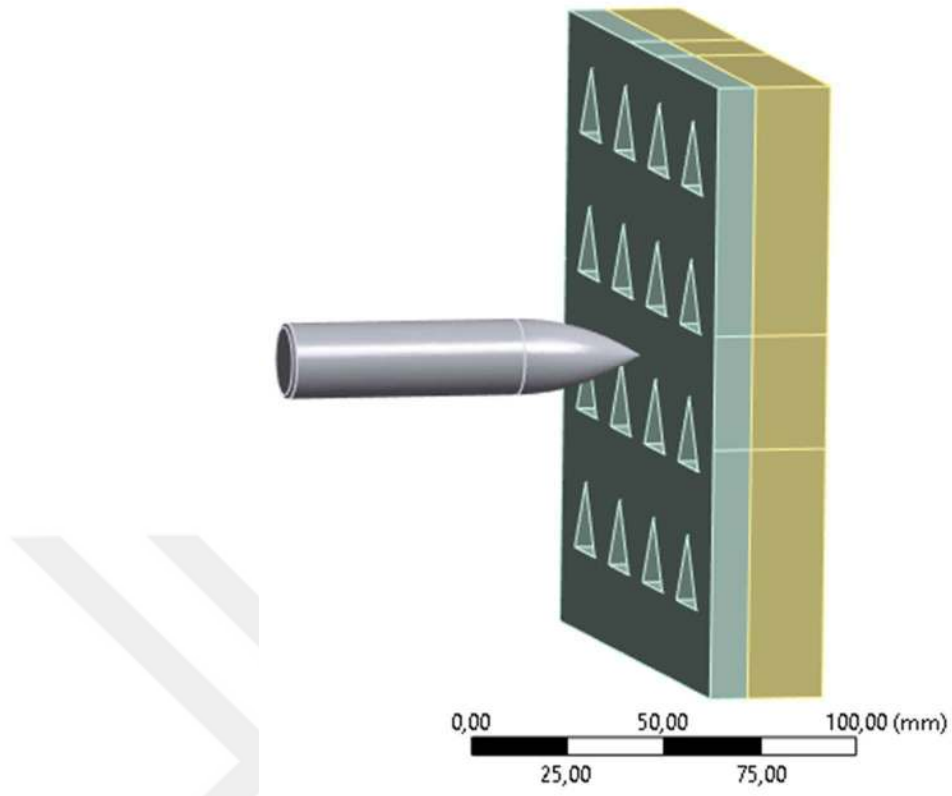
Hız değişim grafiği Şekil 7.115’de verilmiştir. Aşağıda verilen Şekil 7.116’dan de anlaşılacağı gibi mermi 850 m/s hızında 17522 rad/s dđnme ile birinci 10 mm kare delikli levha, ikicisi 20mm kalınlığında dđz levha olan iki adet zırhı delerek geğmiştir.



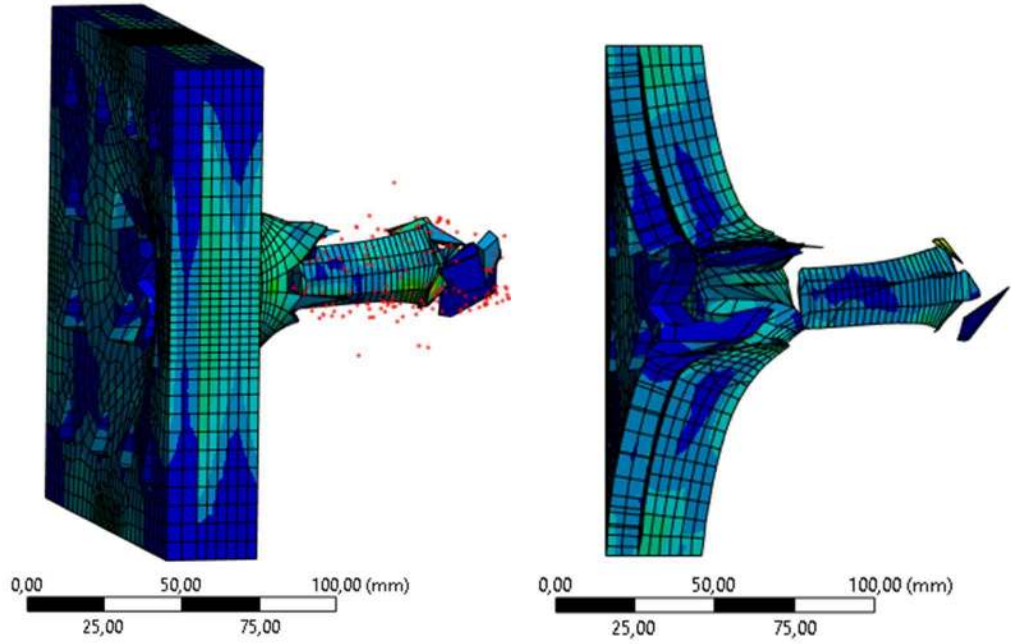
Şekil 7.116. Analiz 23 Hız Probu Dağılımları

Analiz 24

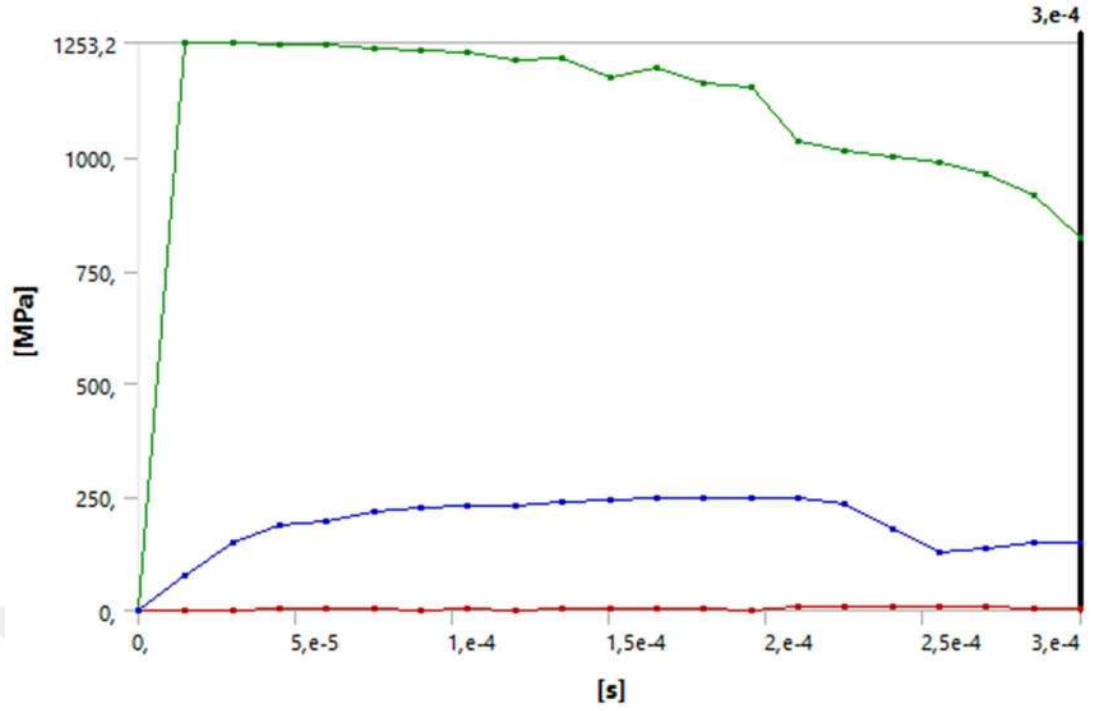
Ogive uçlu mermi kullanarak, birincisi 10 mm kalınlığında uğgen delikli, ikincisi 20mm kalınlığında dđz plaka şeklinde olan zırhın performansını test etmek için Al5083-H116 malzemeden yapılmış zırh tasarlandı. Test, 22°C ortam sıcaklığında geręekleřmiř olup, mermi 850 m/s hızla ateşlendi ve 17522 rad/s dđnüşle zırha ęarptı. Ancak, zırh mermiyi durduramadı ve merminin zırhı terk etme hızı 378,9 m/s olarak ölçüldü.



Şekil 7.117. Analiz 24 Katı Modeli

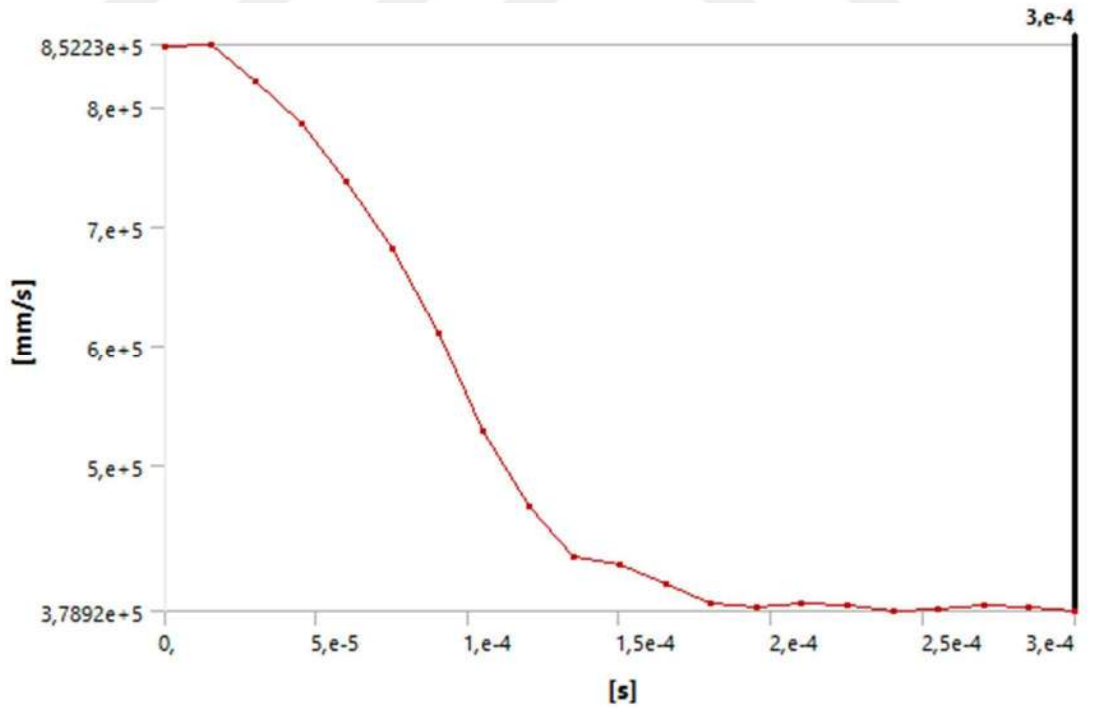


Şekil 7.118. Analiz 24 Eşdeğer Gerilme Dağılımları



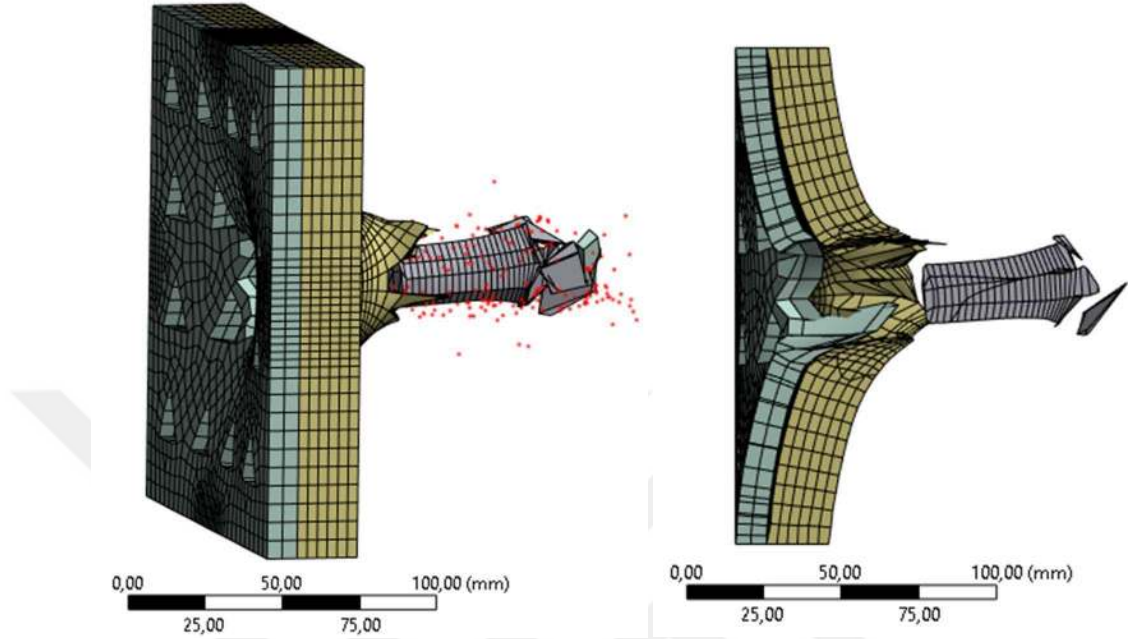
Şekil 7.119. Analiz 24 Eşdeğer Gerilme Grafiği

Analiz sonucu çıkan plastik şekil değişimi değerleri ve renklendirmeleri ile birlikte yukarıdaki Şekil 7.119’de verilmiştir.



Şekil 7.120. Analiz 24 Hız Probu Grafiği

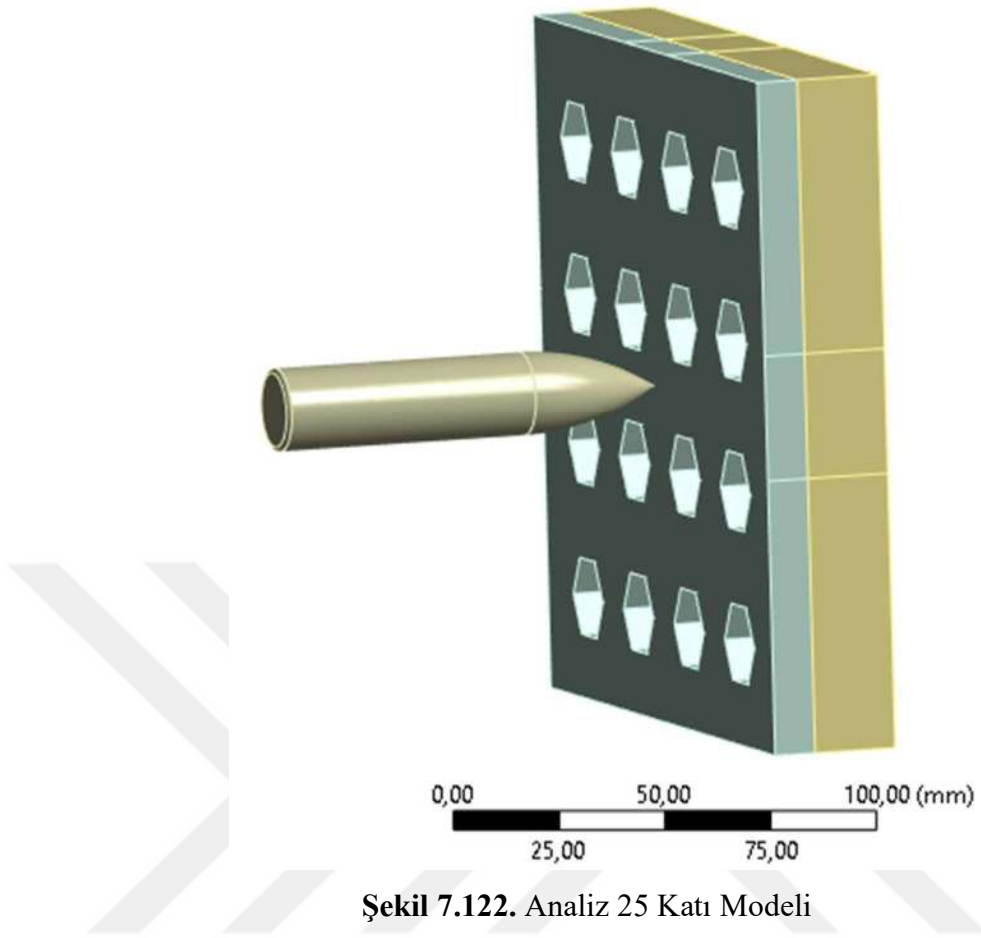
Hız değişim grafiği şekil 7.120’de verilmiştir. Aşağıda verilen şekil 7.121’den de anlaşılacağı gibi mermi 850 m/s hızında 17522 rad/s dönme ile birinci 10 mm gen delikli levha, ikicisi 20mm kalınlığında düz levha olan iki adet zırhı delerek gemiştir.



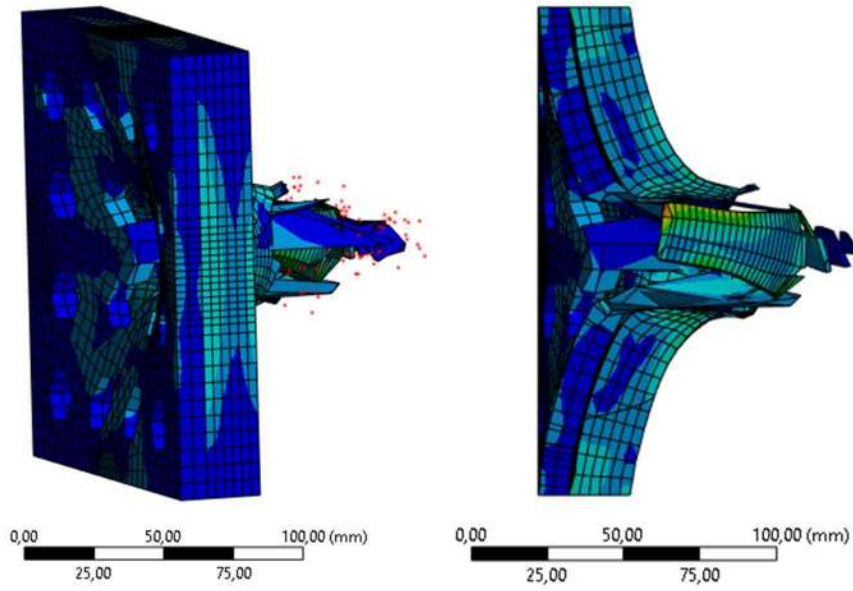
şekil 7.121. Analiz 24 Hız Probu Dağılımları

Analiz 25

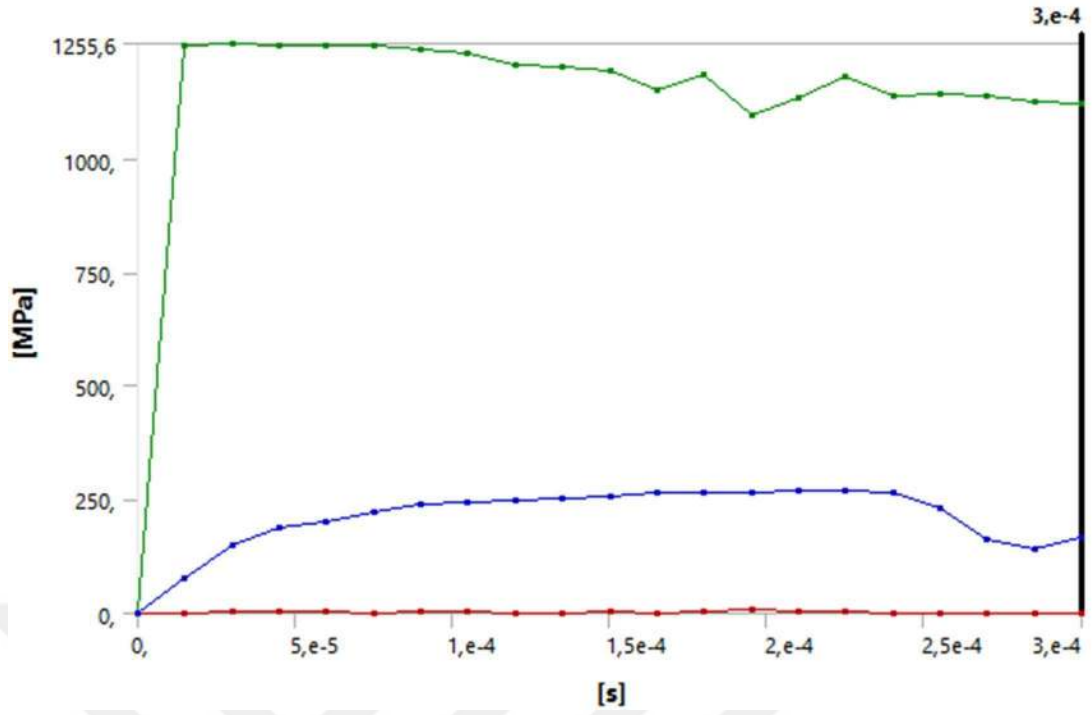
Ogive ulu mermi kullanarak, birincisi 10 mm kalınlığında altıgen delikli, ikincisi 20mm kalınlığında düz plaka şeklinde olan zırhın performansını test etmek için Al5083-H116 malzemeden yapılmış zırh tasarlandı. Test, 22°C ortam sıcaklığında gerekleşmiş olup, mermi 850 m/s hızla ateşlendi ve 17522 rad/s dnşle zırha arptı. Ancak, zırh mermiyi durduramadı ve merminin zırhı terk etme hızı 230,3 m/s olarak ölçüldü.



Şekil 7.122. Analiz 25 Katı Modeli

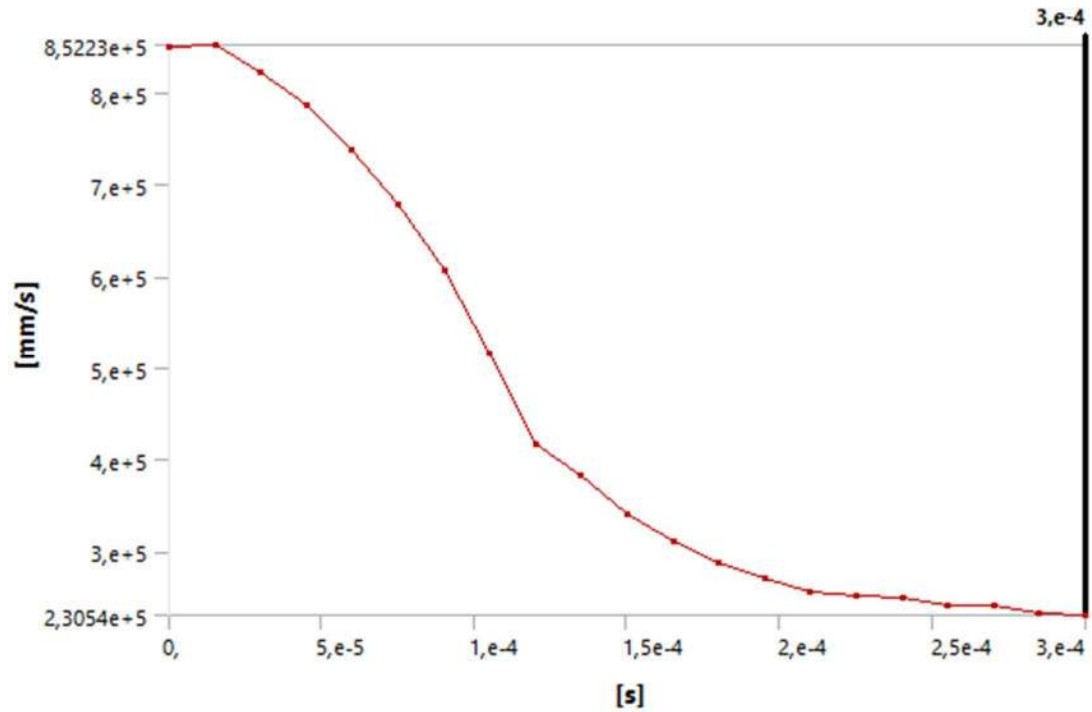


Şekil 7.123. Analiz 25 Eşdeğer Gerilme Dağılımları



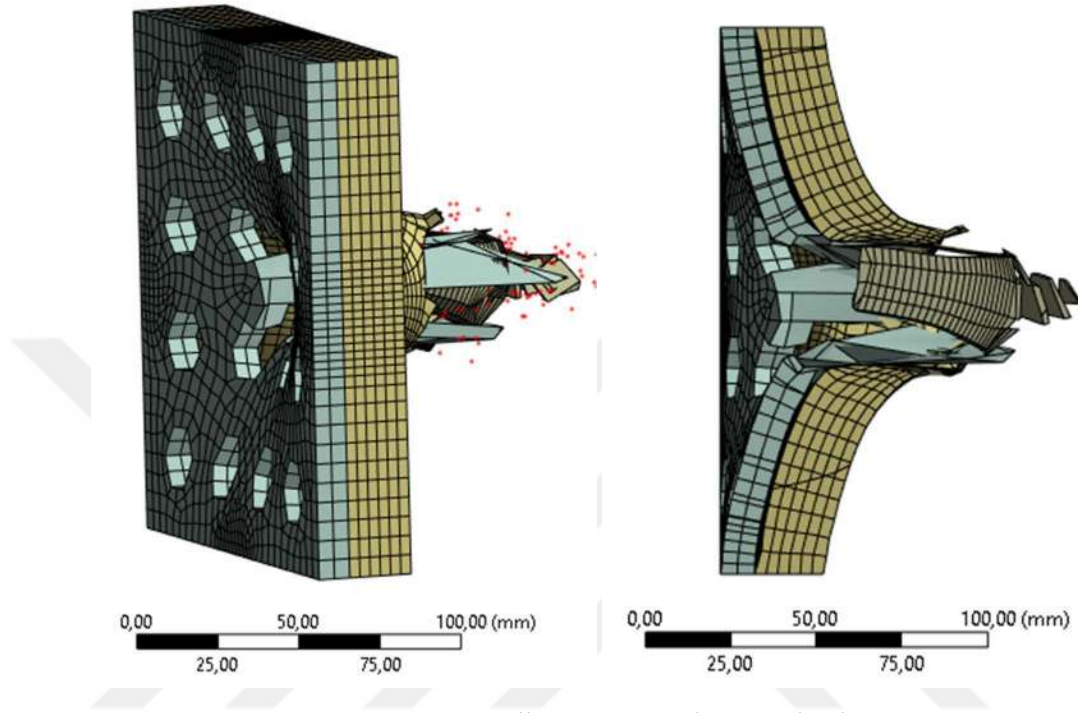
Şekil 7.124. Analiz 25 Eşdeğer Gerilme Grafiği

Analiz sonucu çıkan plastik şekil değişimi değerleri ve renklendirmeleri ile birlikte yukarıdaki Şekil 7.124'de verilmiştir.



Şekil 7.125. Analiz 25 Hız Probu Grafiği

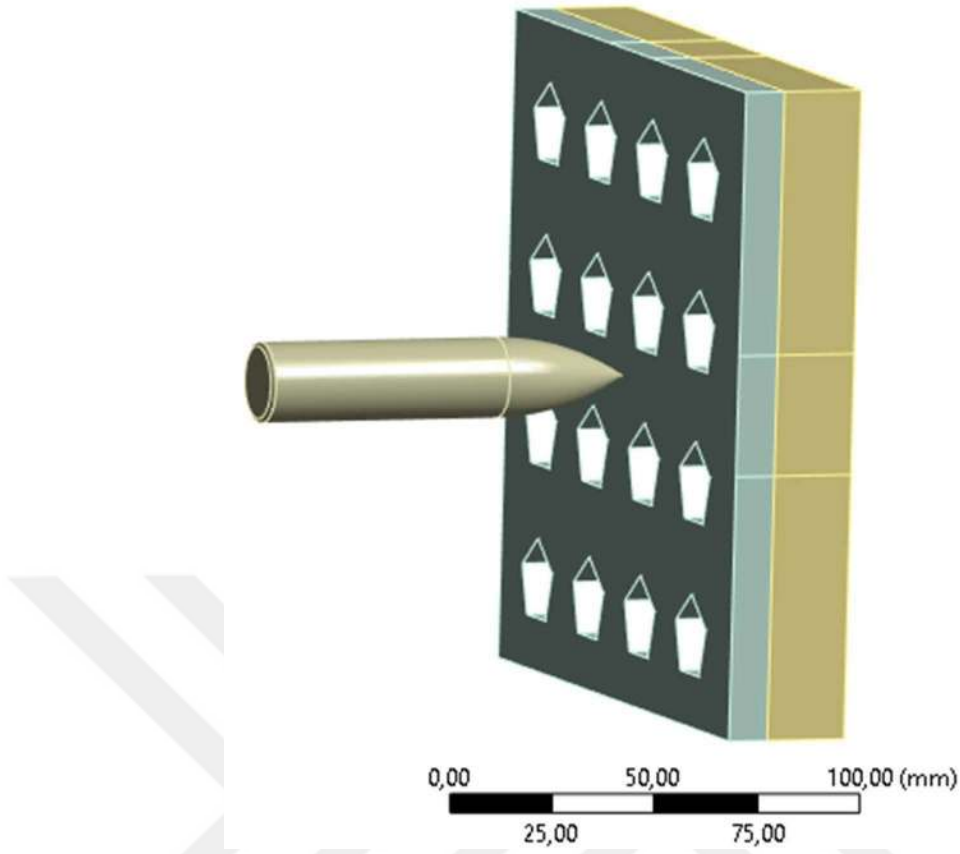
Hız değişim grafiği şekil 7.125’de verilmiştir. Aşağıda verilen şekil 7.126’den de anlaşılacağı gibi mermi 850 m/s hızında 17522 rad/s dönme ile birinci 10 mm altıgen delikli levha, ikicisi 20mm kalınlığında düz levha olan iki adet zırhı delerek gemiştir.



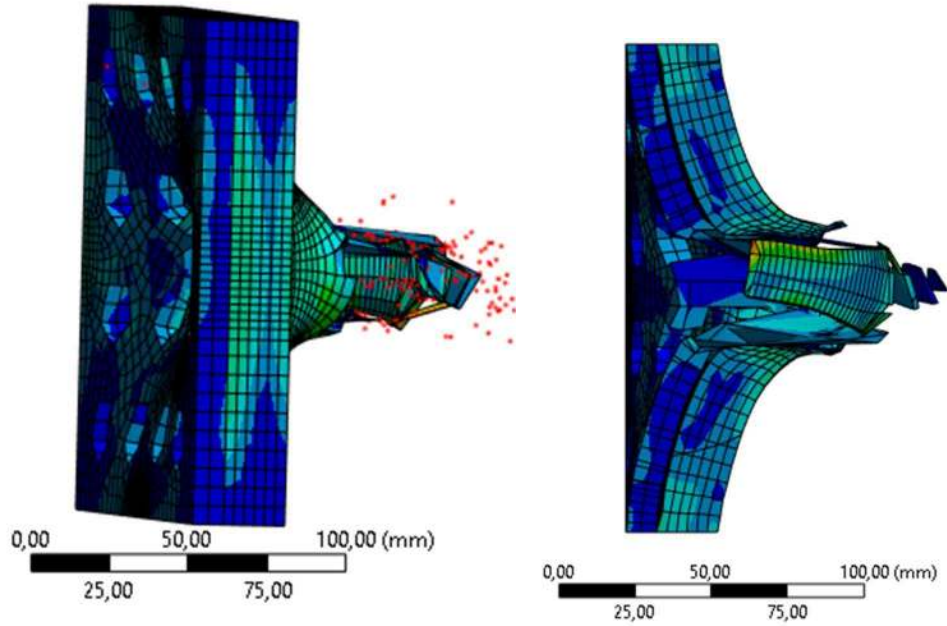
şekil 7.126. Analiz 25 Hız Probu Dağılımları

Analiz 26

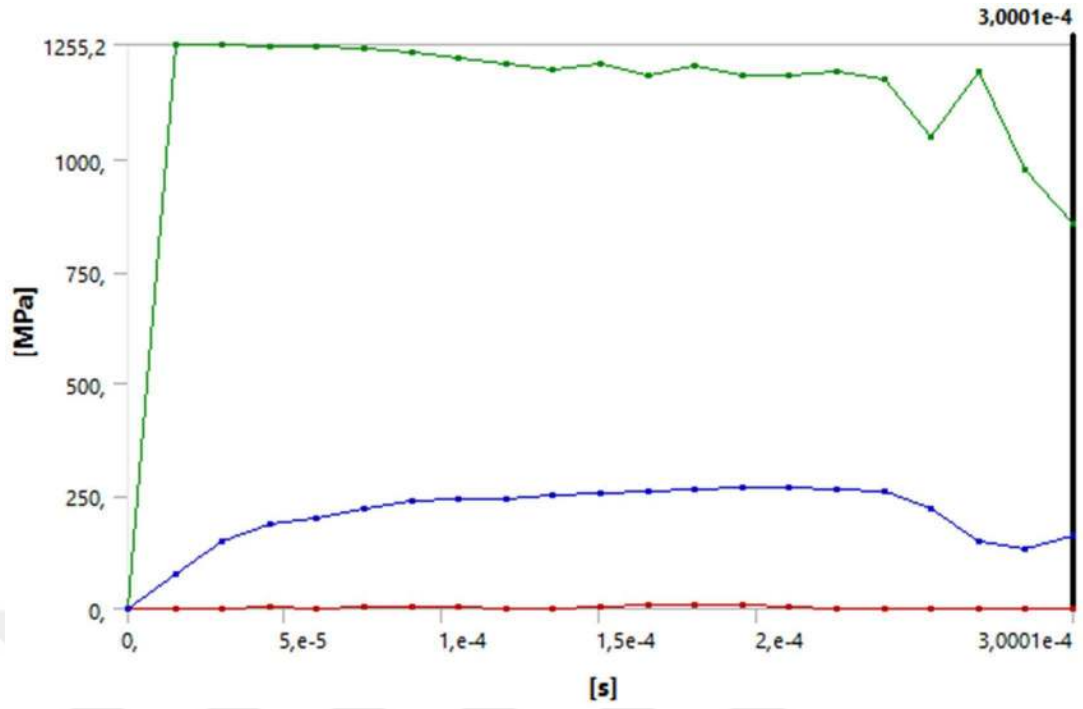
Ogive ulu mermi kullanarak, birincisi 10 mm kalınlığında beşgen delikli, ikincisi 20mm kalınlığında düz plaka şeklinde olan zırhın performansını test etmek için Al5083-H116 malzemeden yapılmış zırh tasarlandı. Test, 22°C ortam sıcaklığında gerekleşmiş olup, mermi 850 m/s hızla ateşlendi ve 17522 dnşle zırha arptı. Ancak, zırh mermiyi durduramadı ve merminin zırhı terk etme hızı 250,6 m/s olarak ölçüldü.



Şekil 7.127. Analiz 26 Katı Modeli

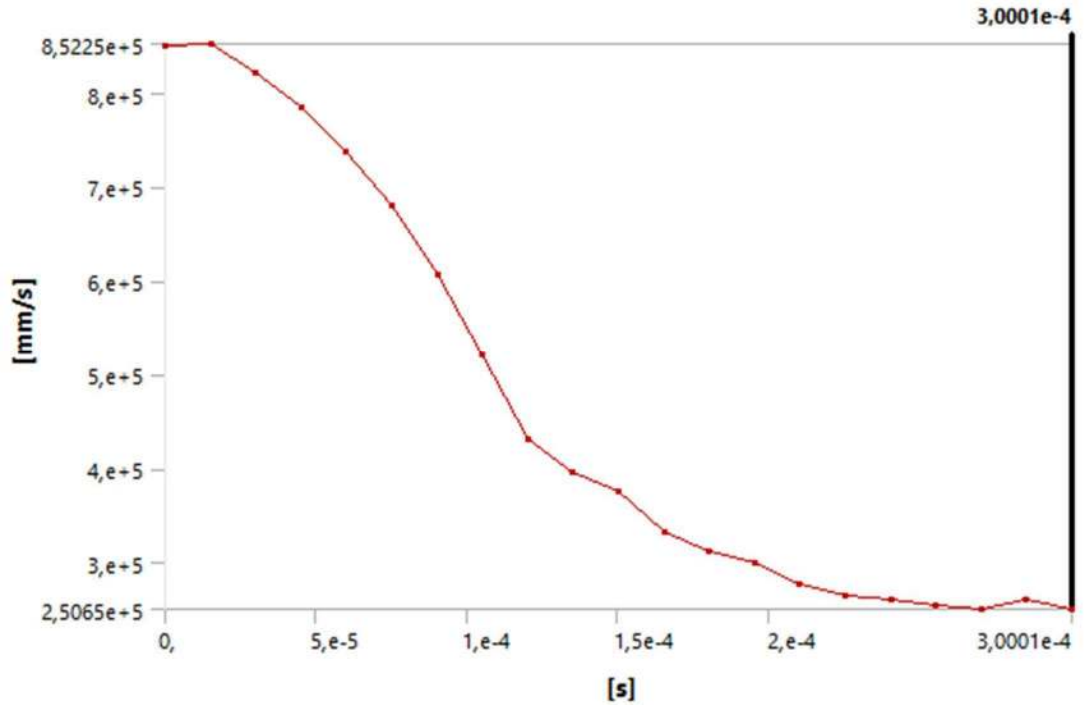


Şekil 7.128. Analiz 26 Eşdeğer Gerilme Dağılımları



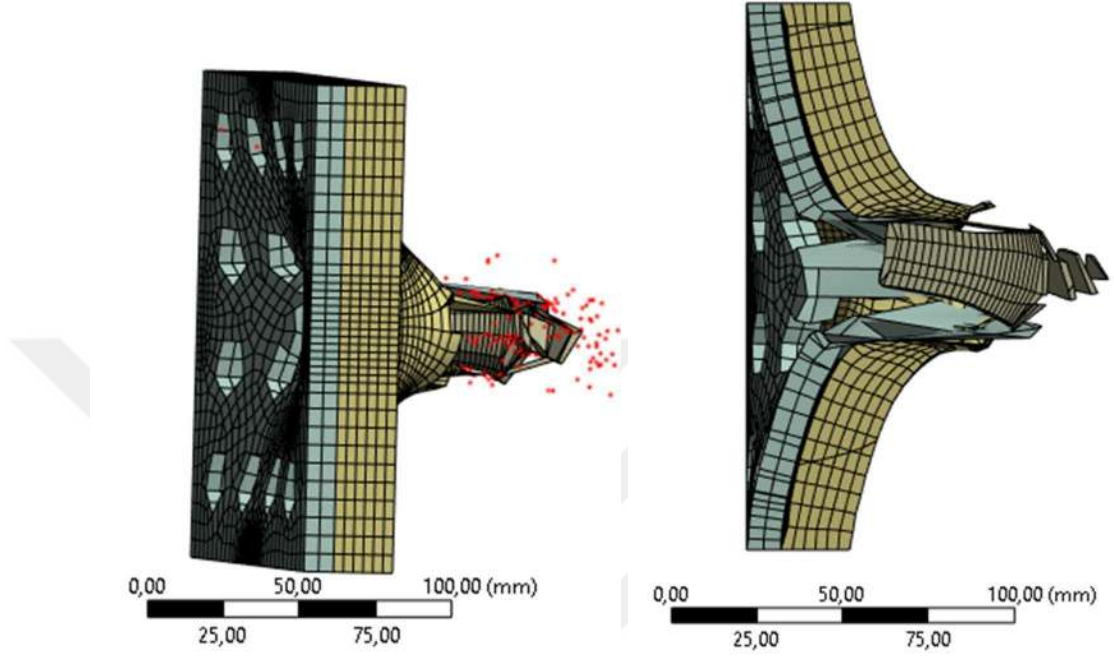
Şekil 7.129. Analiz 26 Eşdeğer Gerilme Grafiği

Analiz sonucu çıkan plastik şekil değişimi değerleri ve renklendirmeleri ile birlikte yukarıdaki Şekil 7.129’de verilmiştir.



Şekil 7.130. Analiz 26 Hız Probu Grafiği

Hız değişim grafiği şekil 7.130’de verilmiştir. Aşağıda verilen şekil 7.131’den de anlaşılacağı gibi mermi 850 m/s hızında 17522 rad/s dönme ile birinci 10 mm altıgen delikli levha, ikicisi 20mm kalınlığında düz levha olan iki adet zırhı delerek gemiştir.



şekil 7.131. Analiz 26 Hız Probu Dağılımları

8. SONUÇ VE ÖNERİLER

Yapılan analizlerin sonuçlarının değerlendirilmesi, karşılaştırılması ve konuyla ilgili öneriler aşağıda sekiz farklı başlık altında belirtilmiştir.

Değerlendirme 1

Yapılan ilk üç analiz doğrulama amaçlı yapılmış olup gerçek değerlerle karşılaştırıldığında çok küçük hata oranları ile başarılı sonuçlar vermiştir. Karşılaştırma tablosu Tablo 8.1’de verilmiştir.

Tablo 8.1. Değerlendirme 1 Karşılaştırma Tablosu

	Zırh Tipi	Zırh Kalınlığı	Mermi Ateşleme Hızı	Analiz Mermi Terketme Hızı	Deney [76] Mermi Terketme Hızı	Hata Oranı
Analiz 1	Düz Levha	20 mm	854,1 m/s	705,2 m/s	700,4 m/s	0,80%
Analiz 2	Düz Levha	20+20 mm	867,6 m/s	415 m/s	402,4 m/s	3,10%
Analiz 3	Düz Levha	20+20+20 mm	1007,6 m/s	0 m/s	0 m/s	0%

Bu üç analizden yola çıkarak aynı ortam şartlarında benzer mesh yapıları kullanılarak yapacağımız analizlerin gerçeğe yakın sonuçlar vereceği görülmüştür.

İlk 3 deneyden sonra yapılan tüm deneyler için mermi olarak S4340 malzemesinden ogive uçlu mermi, zırh olarak Al5083-H116 malzemesinden zırh levhası kullanılarak, mermi 17522 rad/s dönme ve 850 m/s hızla ateşleme yapılmıştır.

Değerlendirme 2

Analiz 4, Analiz 5, Analiz 6 için aralarında boşluk olmayan tekli, ikili ve üçlü katmanlardan oluşan 20mm kalınlığındaki levhalar ile yapılan analizlerin sonuçları Tablo 8.2’de verilmiştir.

Yapılan bu üç analizde görülmüştür ki katman sayıları arttıkça zırhın direnci artmaktadır. Hatta, merminin üç katmanlı levha zırhı durdurduğu görülmüştür.

Tablo 8.2. Değerlendirme 2 Karşılaştırma Tablosu

	Zırh Tipi	Zırh Kalınlığı	Mermi Ateşleme Hızı	Mermi Terketme Hızı
Analiz 4	Düz Levha	20 mm	850 m/s	700,7 m/s
Analiz 5	Düz Levha	20+20 mm	850 m/s	380,5 m/s
Analiz 6	Düz Levha	20+20+20 mm	850 m/s	0 m/s

Değerlendirme 3

Aralarında boşluk olmayan iki adet 20mm kalınlığındaki levhalar (Analiz 5) mermiyi durduramazken, yine aralarında boşluk olmayan üç adet 20mm kalınlığındaki levhaların (Analiz 6) mermiyi durdurduğu görülmüştür. Yapılan analizler sonucunda aralarında boşluk olmayan 20mm kalınlığındaki bir levha ile 30mm kalınlığındaki bir levhadan oluşan katmanlı zırhın da mermiyi durdurabildiği görülmüştür (Analiz 7). Bu üç analizin karşılaştırma tablosu Tablo 8.3'te verilmiştir.

Tablo 8.3. Değerlendirme 3 Karşılaştırma Tablosu

	Zırh Tipi	Zırh Kalınlığı	Mermi Ateşleme Hızı	Mermi Terketme Hızı
Analiz 5	Düz Levha	20+20 mm	850 m/s	380,5 m/s
Analiz 6	Düz Levha	20+20+20 mm	850 m/s	0 m/s
Analiz 7	Düz Levha	20+30 mm	850 m/s	0 m/s

Değerlendirme 4

Aralarında boşluk olmayan iki adet 20mm kalınlığındaki levhalar ile yapılan katmanlı zırh analizi (Analiz 5) ile tek katmanlı 40mm kalınlığındaki levha ile yapılan analiz (Analiz 8) karşılaştırıldığında aralarında fark görülmemiştir. Ancak öneri olarak direkt yapılan analizin doğruluğunu netleştirmek amacıyla gerçek deney yapılabilir.

Tablo 8.4. Değerlendirme 4 Karşılaştırma Tablosu

	Zırh Tipi	Zırh Kalınlığı	Mermi Ateşleme Hızı	Mermi Terketme Hızı
Analiz 5	Düz Levha	20+20 mm	850 m/s	380,5 m/s
Analiz 8	Düz Levha	40 mm	850 m/s	383.2m/s

Değerlendirme 5

20mm kalınlığındaki iki adet levha araları boşluk bırakılarak analizler yapılmıştır. Analizlerin karşılaştırma tablosu Tablo 8.5'te verilmiştir.

Tablo 8.5. Değerlendirme 5 Karşılaştırma Tablosu

	Zırh Tipi	Levhalar Arası Boşluk	Zırh Kalınlığı	Mermi Ateşleme Hızı	Mermi Terketme Hızı
Analiz 5	Düz Levha	0 mm	20+20 mm	850 m/s	380,5 m/s
Analiz 9	Düz Levha	2 mm	20+20 mm	850 m/s	442,7 m/s
Analiz 10	Düz Levha	5 mm	20+20 mm	850 m/s	486,9 m/s
Analiz 11	Düz Levha	10 mm	20+20 mm	850 m/s	508,8 m/s
Analiz 12	Düz Levha	20 mm	20+20 mm	850 m/s	527,7 m/s
Analiz 13	Düz Levha	40 mm	20+20 mm	850 m/s	513,5 m/s

Bu analizler yapılırken merminin dönmesi de eklendiğinden dolayı ilk levhaya çarpan merminin yönünün değişebileceği ikinci levhaya farklı bir açı ile çarparak hızının daha da yavaşlayabileceği düşünülmüştür. Ancak yapılan analizlerin sonucunda bu tezimiz çürümüştür. İki levha arasına boşluk bırakıldığında zırh dayanımının düştüğü, merminin daha hızlı zırhı ter ettiği görülmüştür.

Değerlendirme 6

20mm kalınlığındaki iki levha aralarında farklı açılar verilerek analizler yapılmıştır. İlk plaka sabit tutularak ikinci plakaya 15°, 30°, 45° 'er derecelik açılar verilerek yapılan analiz sonuçları Tablo 8.6'da verilmiştir.

Tablo 8.6. Değerlendirme 6 Karşılaştırma Tablosu

	Zırh Tipi	Levhalar Arası Açı	Zırh Kalınlığı	Mermi Ateşleme Hızı	Mermi Terketme Hızı
Analiz 5	Düz Levha	0°	20+20 mm	850 m/s	380,5 m/s
Analiz 14	Düz Levha	15°	20+20 mm	850 m/s	528,4 m/s
Analiz 15	Düz Levha	30°	20+20 mm	850 m/s	461,2 m/s
Analiz 16	Düz Levha	45°	20+20 mm	850 m/s	290,9 m/s

Yapılan bu deneylerden görülmüştür ki; küçük açılı değişikliklerinin mermiyi yavaşlatmada etkili olmadığı ancak 45° gibi bir açılı yapıldığında zırhın daha kuvvetli hale geldiği görülmüştür. Bunun nedeni olarak levhanın et kalınlığını bir kenar olarak düşünecek olursak merminin izleyeceği yol hipotenüs olacak ve daha uzun bir yoldan geçecektir. 45° ve üstündeki açılarda mermi yavaşlaması tezi analiz ile doğrulanmıştır. Daha farklı açılar ve kalınlıklarda analizler yapılarak bu alanda ideal zırh bulunabilir.

Değerlendirme 7

İlk levha daire şeklinde delikli ve sadece et kalınlıkları değiştirilerek, ikinci levha 20mm kalınlıkta düz ve sabit tutularak analizler yapılmıştır. Yapılan analizlerin karşılaştırma tablosu Tablo 8.7’de verilmiştir.

Tablo 8.7. Değerlendirme 7 Karşılaştırma Tablosu

	Delikli Levha Kalınlığı	Düz Levha Kalınlığı	Mermi Ateşleme Hızı	Mermi Terketme Hızı
Analiz 7	Düz Levha	20+30 mm	850 m/s	0 m/s
Analiz 17	5 mm	20 mm	850 m/s	511,3 m/s
Analiz 18	6 mm	20 mm	850 m/s	448,4 m/s
Analiz 19	7 mm	20 mm	850 m/s	459,3 m/s
Analiz 20	10 mm	20 mm	850 m/s	265,5 m/s
Analiz 21	12 mm	20 mm	850 m/s	13,55 m/s
Analiz 22	13.5 mm	20 mm	850 m/s	0 m/s

Çıkan analiz sonuçları incelendiğinde aralarında boşluk olmayan iki adet düz levhadan oluşan zırha kıyasla aralarında boşluk olmayan iki adet levhadan ilki delikli ikinci düz levhadan oluşan zırhın dayanımının daha yüksek olduğu görülmüştür. Örneğin, Analiz 7’de düz ve katmanlı levhalardan oluşan zırh toplamda 50mm kalınlıkta mermiyi durdurabilmiştir. Ancak Analiz 22’de bir delikli bir düz levhadan oluşan zırh toplamda 33,5mm kalınlıkta mermiyi durdurmuştur.

Başta delikli levha dayanımı daha az gibi görünse de ilk aldığı darbeyi sönmülemde boşluklar fayda sağlamıştır. Ayrıca çatlakların devamlılığını önlediği de görülmüştür. Bir başka faydası ise delikli levhadan geçen ve düz levhaya ulaşan uç ile

hala delikli levha içinde halan arka kısmı arasında dönmeye karşı tersine bir mukavemet uyguladığı ve merminin yönünde sapma meydana getirdiği görülmüştür.

Değerlendirme 8

İlk levha farklı geometrik şekillerde delikli ve 10mm et kalınlığına sahip levha ile, ikinci levha 20mm kalınlıkta düz ve sabit tutularak analizler yapılmıştır. Yapılan analizlerin karşılaştırma tablosu Tablo 8.8’de verilmiştir.

Tablo 8.8. Değerlendirme 7 Karşılaştırma Tablosu

	Delikli Levha Tipi	Delikli Levha Kalınlığı	Düz Levha Kalınlığı	Mermi Ateşleme Hızı	Mermi Terketme Hızı
Analiz 20	Daire	10 mm	20 mm	850 m/s	265,5 m/s
Analiz 23	Kare	10 mm	20 mm	850 m/s	192,8 m/s
Analiz 24	Üçgen	10 mm	20 mm	850 m/s	378,9 m/s
Analiz 25	Altıgen	10 mm	20 mm	850 m/s	230,5 m/s
Analiz 26	Beşgen	10 mm	20 mm	850 m/s	250,6 m/s

Yukarıda yapılan analiz karşılaştırmalarına göre dayanımı arttıran geometrik şekiller sırasıyla kare, altıgen, beşgen, daire, üçgen şeklinde olduğu görülmüştür.

8.1. Yorumlar

Yapılan tüm analizler ve değerlendirmeler neticesinde görülmüştür ki, en iyi sonuçlar delikli levhalar kullanılarak yapılan katmanlı zırhlarda ve açılı zırhlarda alınmıştır. Bu bir tesadüf olmamakla birlikte daha önce yapılan tez ve makale çalışmalarında da benzeri sonuçlar elde edildiği görülmüştür. Bu çalışmada diğer çalışmalardan farklı olarak analizde merminin dönmesi de dahil edilmiştir. Sonuçlarda ciddi oranda bir fark yaratmamıştır. Fakat özellikle delikli levhalarda dönme ile merminin yönünün saptığı görülmüştür.

İkinci dünya savaşında yeni tanklar daha önce zarar görüp kullanılamaz duruma gelirken, daha önce savaşlardan çıkan eski, üzerinde mermi, şarapnel delikleri olan darbe görüp daha önce hasar almış olan tanklar yeni tanklara göre daha uzun süre ayakta kalmışlardır. Tam da bu çalışmada bunun nedenini kanıtlamış olduk. Zırhın yeni ve düzgün olmasından ziyade boşlukların, açılarının tasarımı önemi görülmüştür.

Bu çalışmanın devamı olarak;

- Farklı mermi tiplerine karşı tasarlanan zırhların balistik incelemesi,
- Farklı zırh malzemeleri kullanılarak balistik incelemesi,
- Bu çalışmada kullanılan şekillerin dışında farklı geometrik şekilde tasarlanmış boşluklu zırhların balistik performansının incelenmesi,
- Katmanlı zırhlarda farklı açılar deneyerek balistik dayanım için en ideal açının araştırılması,
- Delikli (boşluklu) zırhlarda deşiklerin oluşturulurken açı verilmesi ile düz delik açılması arasındaki farkın karşılaştırılması,
- Bu çalışmada boşluklu zırh ve düz zırh kalınlığı sabit tutarak yapılmıştır. Farklı kalınlıklarda zırh tasarlanarak konumlandırmaları katman sayıları değiştirilerek balistik performans incelemesi,

Yukarıda maddeler halinde bahsedilen konular yeni çalışma konuları olabileceği gibi, bu çalışmalar ve değerlendirmeler ile ilgili daha farklı şekiller, boyutlar, açılar denenerek bu alanda en ideal bir zırh tasarlanabilir.

KAYNAKLAR

- [1] Moss, G.M., Leeming, D.W. ve Farrar, C.L. Military Ballistics, Brassey's, London, 1995, 215 s.
- [2] Fletcher, D., Bryan, T. British Mark I Tank 1916. Ed: Simone Drinkwater, Osprey Publishing, Oxford, 2004, 49 s.
- [3] Osce. Treaty On Conventional Armed Forces In Europe. 1990, 118 s. [Çevrimiçi]. Available: <https://www.osce.org/library/14087>.
- [4] Coffey, R. A. Doctrinal Orphan or Active Partner A History of US Mechanized Infantry Doctrine. Carnegie Mellon University, Military History, Fort Leavenworth, 1983, 156s. (Yüksek Lisans Tezi)
- [5] İbış, M. Ö., Kahraman, Y., Genel, K. Effect of adhesive on ballistic performance of multi-layered steel. International Journal of Impact Engineering. 2023, 176, 104559.
- [6] Tan, M., Zhang, X., Xiong, W., Liu, C., Han, G., Yi, L. Influence of layered back plate on the ballistic performance of ceramic armor. Composite Structures. 2023, 308, 116688.
- [7] Yapıcı, A. E-Camı/Epoksi Tabakalı Kompozitlerde Düşük Hızlı Darbe Davranışının Sonlu Elemanlar Yöntemiyle İncelenmesi. Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi. 2016, 1(1), 48-60 s.
- [8] Acar, E., Aydın, M. Fonksiyonel Kademelendirilmiş Plakalarda Kalınlık Boyunca Kompozisyonel Değişimin Balistik Performans Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi. Politeknik Dergisi. 2018, 21(4): 951-960s.
- [9] Ong, C. W., Boey, C. W., Hixson, R. S., Sinibaldi, J. O. Advanced Layered Personnel Armor. Int. J. Impact Eng. 2011, 38(5), 369–383 s.
- [10] Özer, İ. Balistik Çarpma Etkisinin Sonlu Elemanlar Yöntemi İle İncelenmesi. Mustafa Kemal Üniversitesi, Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Hatay, 2015, 67 s. (Yüksek Lisans Tezi)
- [11] Jena, P. K., Mishra, B., Siva Kumar, K., Bhat, T. B. An Experimental Study On The Ballistic Impact Behavior Of Some Metallic Armour Materials Against 7.62mm Deformable Projectile, Mater. Des. 2010, 31(7), 3308–3316 s.
- [12] Abaş, A. Tetik mekanizmasına gelen dinamik kuvvetlerin sonlu elemanlar yöntemiyle analizi. Kırıkkale Üniversitesi, Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Kırıkkale, 2011, 89 s. (Yüksek Lisans Tezi)
- [13] Demir, T., Übeyli, M., Yıldırım, O.R., Investigation on the ballistic impact behavior of various alloy against 7.62 mm armor piercing projectile. Material and Design. 2008, 29, 2009-2016 s.

- [14] Cheng, Y.H., Wu, H., Jiang, P.F., Fang, Q. Ballistic resistance of high-strength armor steel against ogive-nosed projectile impact. *Thin-Walled Structures*. 2023, 183, 110350.
- [15] Öztörün, D. Bir ağır silah namlusunun sonlu elemanlar yöntemi ile elastik-plastik gerilme analizi, Gazi Üniversitesi, Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Ankara, 2013, 156 s. (Yüksek Lisans Tezi)
- [16] Zaera, R., Sanches-Galves, V. Modelling of Fracture Processes in the Ballistic Impact on Ceramic Armours. *Journal de Physique*, 1997, 4(1), 667-674 s.
- [17] Wang, Y., Chen, X., Xiao, X., Vershinin, V.V., Ge, R., Li, D. Effect of Lode angle incorporation into a fracture criterion in predicting the ballistic resistance of 2024-T351 aluminum alloy plates struck by cylindrical projectiles with different nose shapes. *International Journal of Impact Engineering*. 2020, 139, 103498.
- [18] Turhan, L., Eksik,Ö., Yalçın, E., Demirural, A., Baykara, T. Computational Simulations and Ballistic Verification Tests For 7.62mm AP and 12.7 mm AP Bullet. *Structures Under Shock and Impact*. 2008, 10, 379-388s.
- [19] Özşahin, E., Tolun, S. Yüzey Kaplaması ve Destek Katman İlavesinin Alüminyum Levhaların Balistik Performansına Etkileri. *Havacılık ve Uzay teknolojileri Dergisi*. 2010, 6(1), 41-50 s.
- [20] Dateraksa, K., Sujirote, K., McCuiston, R., Atong, D. Ballistic Performance of Ceramic/S2 - Glass Composite Armor. *Journal of Metals, Materials and Minerals*. 2012, 6(1), 33-39 s.
- [21] Mei H., Wang, Y., Liu, X., Cao, D., Liu, L. Numerical Investigation on Anti-Penetration Behaviour of Ceramic/Metal Target Under Ballistic Impact. *Journal of Physics: Conference Series*. 2012, 419-426 s.
- [22] Xhang, Y., Dong, H., Liang, K., Huang, Y. Impact simulation and ballistic analysis of B4C composite armour based on target plate tests. *Ceramics International*, 2021, 47, 7(A), 10035-10049s.
- [23] Nayak, N., Banerjee, A., Sivaraman, P. Ballistic Impact Response of Ceramic - Faced Aramid Laminated Composites Against 7.62 mm Armour Piercing Projectiles. *Defences Science Journal*. 2013, 369-375 s.
- [24] Serjouei, A., Chi, A., Sridhar, I., Tan, G. An Empirical Model For The Ballistic Limit of Bi-Layer Ceramic/Metal Armour. *Procedia Engineering*. 2014, 14-18 s.
- [25] Plonka, B., Remsak, K., Rajda, M., Wilczewski, J. Light Metal Alloys in Multilayer Passive Armours For Military Vehicles. *Szybkobieżne Pojazdy Gąsienicowe*. 2015, 38.
- [26] Godzimirski, J., Janiszewski, J., Roskowicz, M., Surma, Z. Ballistic Resistance Tests of Multi-Layer Protective Panels. *Maintenance and Reliability*. 2015, 416-422 s.

- [27] Jongpaiboonjit, N. Influence of Boundary Conditions on Ceramic/ Metal Plates Under Ballistic Loads. *Journal of Materials Science and Chemical Engineering*. 2015, 97-101 s.
- [28] Hedayati, E., Vahedi, M. Evaluating Impact Resistance of Aluminum 6061- T651 Plate Using Smoothed Particle Hydrodynamics Method. *Defence Science Journal*, 2018, 251-259 s.
- [29] Borvik, T., Langseth, M., Hopperstad, O.S., Malo, K.A. Ballistic penetration of steel plates. *International Journal of Impact Engineering*, 1999, 22, 855-886 s.
- [30] Borvik, T., Dey, S., Clausen, A.H. Perforation resistance of five different high-strength steel plates subjected to small-arms projectiles. *International Journal of Impact Engineering*. 2009, 2036, 948-964 s.
- [31] Flores-Johnson, E.A., Saleh, M., Edwards, L. Ballistic performance of multi-layered metallic plates impacted by a 7.62-mm APM2 projectile. *International Journal of Impact Engineering*. 2011, 38, 1022-1032 s.
- [32] Chocron, S., Anderson, C.E., Grosch, D.J., Popelar, C.H. Impact of the 7.62- mm APM2 projectile against the edge of a metallic target. *International Journal of Impact Engineering*. 2001, 25, 423-431 s.
- [33] Warren, T.L. ve Poormon, K.L. Penetration of 6061-T6511 aluminum targets by ogive-nosed VAR 4340 steel projectiles at oblique angles: experiments and simulations. *International Journal of Impact Engineering*. 2001, 25, 993-1022 s.
- [34] Dey, S., Borvik, T., Teng, X., Wierzbicki, T., Hopperstad, O.S. On ballistic resistance of double-layered steel plates: An experimental and numerical investigation. *International Journal of Impact Engineering*, 2007, 44, 6701-6723 s.
- [35] Arias, A., Martinez, J.A.R., Rusinek, A. Numerical simulations of impact behaviour of thin steel plates subjected to cylindrical, conical and hemispherical non-deformable projectiles. *Engineering Fracture Mechanics* . 2008, 75, 1635-1656.
- [36] Flores, J.E.A., Saleh, M., Edwards, L. Ballistic performance of multi-layered metallic plates impacted by a 7.62-mm APM2 projectile. *International journal of Impact Engineering*. 2011, 38, 1022-1032 s.
- [37] Babaie, B., Shokrieh, M.M., Daneshjou, K. The ballistic resistance of multi-layered targets impacted by rigid projectiles. *Materials Science and Engineering*. 2011, 530, 208-217 s.
- [38] Mishra, B., Jena P.K., Ramakrishna, B., Madhu, V., Bhat, T.B., Gupta, N.K. Effect of tempering temperature, plate thickness and presence of holes on ballistic behavior and ASB formation of a high strength steel. *International Journal of Impact Engineering*. 2017, 44, 17-28 s.
- [39] Mishra, B., Ramakrishna, B., Jena, P.K., Sivakumar, K., Madhu, V., Gupta, N.K. Experimental studies on the effect size and shape of holes on damage and

microstructure of high hardness armour steel plates under ballistic limits. *Material and Design*. 2018, 130, 520-534 s.

- [40] Teng, X., Dey, S., Borvik, T., Wierzbicki, T. Protection performance of double-layered metal shields against projectile impact. *Journal of Mechanics of Materials and Structures*. 2007, 2(7), 1309-1330 s.
- [41] Li, Z., Xue, Y., Sun, B., Gu, B. Ballistic penetration damage for hybrid carbon/Kevlar/UHMWPE fiber laminated composites: Experimental and numerical techniques. *Composite Structures*, 2023, 316, 117037.
- [42] Wei, Z., Yunfei, D., Sheng, C.Z., Gang, W. Experimental investigation on the ballistic performance of monolithic and layered metal plates subjected to impact by blunt rigid projectile. *International Journal of Impact Engineering*. 2012, 49, 115- 129 s.
- [43] Woodward, R.L., Cimpoeru, S.J. A study of the perforation of aluminium laminate targets. *International Journal of Impact Engineering*. 1998, 21(3), 117-131 s.
- [44] Panda, H.S., Jagadeesha T. Impact analysis of Rifle bullet on corrugated sandwich panel structures for defense applications. 2021, 46, 17, 8444-8449s.
- [45] Holmen, J.K., Solberg, J.K., Hopperstad, O.S., Borvik, T. Ballistic impact of layered and case-hardened steel plates. *International Journal of Impact Engineering*. 2017, 110,4-14 s.
- [46] Abdel-Wahed, M.A., Salem, A.M., Zidan, A.S., Riad, A.M. Penetration of a small caliber projectile into single and multi-layered targets. *Proc. of 4th European Conf. On Computational Mechanics*. 2010, 6, 10 s.
- [47] Zaera, R., Sanchez-Saez, S., Perez- Castellanos, J.L., Navarro, C. Modelling of the adhesive layer in mixed ceramic/metal armours subjected to impact. *Composite Part A*. 2000, 31, 823-833 s.
- [48] Tasdemirci, A., Tunusoğlu, G., Güden, M. The effect of the interlayer on the ballistic performance of ceramic/composite armors: Experimental and numerical study. *Internayional Journal of Impact Engineering*. 2012, 44, 1-9 s.
- [49] Uslu, M. DOCOL 22MnB5 çeliğinin balistik özelliklerinin incelenmesi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, İstanbul, 2007, 146 s. (Yüksek Lisans Tezi)
- [50] Çayıroğlu, İ., Dizdar, E.N. Kapsülsüz ve barutsuz mermi atan hafif silah tasarımı. *Teknoloji*. 2004, 7 (2), 339-344 s.
- [51] Gündüzer, O. Namlu cidarı boyutlandırılmasına iç balistik davranışın etkisi. Gazi Üniversitesi. Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Ankara, 2011, 149 s. (Yüksek Lisans Tezi)

- [52] Akman, Y. Eskitmeye tabi tutulan kompozit başlıkların balistik testlerinin yapılması ve analizi. Balıkesir Üniversitesi, Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Balıkesir, 2012, 60 s. (Yüksek Lisans Tezi)
- [53] Candan, C. Kompozit zırh imalat parametrelerinin terminal balistik özellikler üzerine etkileri. Selçuk Üniversitesi, Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Konya, 2005, 173 s. (Doktora Tezi)
- [54] Özgültekin S. E. Balistik Zırhlarda Kullanılan Kompozit Malzeme Kombinasyonlarının İncelenmesi. Sakarya Üniversitesi, Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı , Sakarya, 2012, 72 s. (Yüksek Lisans Tezi)
- [55] Deniz, H. Çift Fazlı Bir Çeliğin 7,62 mm'lik Zırh Delici Mermi Karşısında Balistik Davranışının İncelenmesi. Gazi Üniversitesi Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Ankara, 2009, 67 s. (Yüksek Lisans Tezi)
- [56] Meyers, M. A. Dynamic Behavior Of Materials. Hoboken, John Wiley & Sons, Inc., Nj, Usa, 1994, 688 s.
- [57] Cheng, Y.H., Wu, H., Zhao R.G., Zhou, F. Mechanical characteristics and ballistic behaviors of high strength and hardness armor steels. Journal of Constructional Steel Research. 2022, 197, 107502.
- [58] Reddy, G. M., T. Mohandas, T., Papukutty, K. Effect Of Welding Process On The Ballistic Performance Of High-Strength Low-Alloy Steel Weldments. J. Mater. Process. 1998, 74(1-3), 27–35 s.
- [59] Ünaler, E. Development And Characterization Of Light-Weight Armor Materials İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Ana Bilim Dalı, İzmir, 2005, 81 s. (Yüksek Lisans Tezi)
- [60] Deniz, T. Ballistic Penetration of Hardened Steel Plates. Orta Doğu Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Ankara, 2010, 133 s. (Yüksek Lisans Tezi)
- [61] Dubey, R., Jayaganthan, R., Ruan, D., Gupta, N.K., Jones, N., Velmurugan, R. Ballistic perforation and penetration of 6xxx-series aluminium alloys: A review. International Journal of Impact Engineering. 2023, 172, 104426.
- [62] Bakar, B. Alümina katkılı β silisyum karbürün sinterlenmesi ve karakterizasyonu. İstanbul Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, İstanbul, 2009, 82 s. (Yüksek Lisans Tezi)
- [63] Alkan, M. Kendiliğinden ilerleyen yüksek sıcaklık sentezi yöntemi ile bor karbür tozu üretimi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, İstanbul, 2008, 54 s. (Yüksek Lisans Tezi)
- [64] Gençkan, D. Reaktif spark plazma sinterleme yöntemi ile B4C/SiC kompoziti eldesi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, İstanbul, 2009, 64 s. (Yüksek Lisans Tezi)

- [65] Yılmaz, B. Zırh uygulamalarına yönelik grafen katkılı SiC seramik kompozitlerin üretimi ve karakterizasyonu. TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Ankara, 2020, 85 s. (Yüksek Lisans Tezi)
- [66] Guardia, M. US Army and Marine Corps MRAPs: Mine Resistant Ambush Protected Vehicles. Bloomsbury Publishing, 2013, 49 s.
- [67] Ben-Dor, G., Dubinsky, A., Elperin, T. Optimization Of two-Component Composite Armor Against Ballistic Impact. Composite Structures. 2004, 89-94 s.
- [68] Pol, M., Bidi, A., Hoseini A., Liaghat, G. Analysis Of Normal Penetration Of Ogive-Nose Projectiles Into Thin Metallic Plates. World Academy Of Science, Engineering And Technology. 2009, 235-238 s.
- [69] Borvik, T., Forrestal, M., Hopperstad, O., Warren T., Langseth M. Perforation of AA5083-H116 Aluminium Plates With Conical-Nose Steel Projectiles-Calculations. International Journal of Impact Engineering. 2009, 36(3), 426-437 s.
- [70] Woodward R., Cimpoeu, S. A Study Of The Perforation Of Aluminium Laminate Targets. International Journal Of Impact Engineering. 1998, 117-131 s.
- [71] Thompson, W. An Aproximate Theory Of Armour Penetration. International Journal Of Applied Physics. 1995, 80-82 s.
- [72] Wijk, G., Hartmann, M., Tyrberg, A. A Model For Rigid Projectile Penetration And Perforation Of Hard Steel And Metallic Targets. FOI Swedish Defence Research Agency, 2005, 82 s.
- [73] Lambert J., Jonas, G. Towards Standardization Of In Terminal Ballistic Testing: Velocity Representation. Ballistic Research Laboratory. 1976, 82 s.
- [74] Yanen, C., Solmaz, M.Y. Tabakalı Hibrit Kompozitlerin Bireysel Zırh Malzemesi Olarak Üretimi Ve Balistik Performanslarının İncelenmesi. El- Cezeri Fen Ve Mühendislik Derg. 2016, 3(2), 82-132 s.
- [75] Kural, S., Ayvaz, M. Numerical Simulation on Balistic Performance of SiC/Light Metal Laminated Composite Armor against .30 APM2. Celal Bayar University Journal of Science. 2020, 16(4), 409-418 s.
- [76] Borvik, T., Forrestal, M.J., Warren, T.L. Perforation of 5083- H116 aluminum armor plates with ogive-nose rods and 7.62 mm APM2 bullets. Experimental Mechanics. 2010, 50, 969- 978 s.