

METAL ZIRH MALZEMELERİN
BALİSTİK PERFORMANSLARININ ARAŞTIRILMASI

Proje No: 106M211

Prof. Dr. R. Orhan YILDIRIM
Prof. Dr. Bilgehan ÖGEL
Doç. Dr. Mustafa ÜBEYLİ
Teyfik DEMİR
Gökhan ÖZTÜRK
Tansel DENİZ

Ağustos 2009
ANKARA

METAL VE KATMANLI ZIRH MALZEMELERİN 7,62 mm'lik ZIRH DELİCİ MERMİLER KARŞISINDAKİ BALİSTİK BAŞARIMININ İNCELENMESİ

ÖZET

Sivil ve askeri uygulamalarda tam balistik koruma sağlayan ve mümkün olan en düşük ağırlıktaki zırh seçebilmek için mühendislik malzemelerinin balistik başarımlarının bilinmesi oldukça önemlidir. Bu çalışmada, mühendislik malzemelerinden bazı çelikler (AISI 1050, AISI 4140, AISI 4340, 100Cr6), alüminyum alaşımları (AA)(AA 5083 ve AA 7075) ile katmanlı kompozitler 7,62 mm'lik zırh delici mermiler karşısında balistik olarak incelenmiştir. Çelik numuneler AISI 1050 hariç dört farklı ısıl işlem, alüminyum alaşımlarından AA 7075'te üç farklı ısıl işlem koşulunda denenmiştir. Dört farklı sertlik değeri temel alınarak ısıl işlem uygulanan çeliklerde 40, 50, 55 ve 60 HRC sertlikler elde edilmeye çalışılmıştır. Alüminyum alaşımı 7075'te ise tavlama (T0), yaşlandırma (T651) ve aşırı yaşlandırma (T7351) ısıl işlemleri uygulanmıştır. AISI 1050 ve AA 5083 piyasadan temin edildikleri gibi doğrudan kullanılmıştır. Daha sonra tüm malzemelerin balistik deneylerden önce mekanik özellikleri belirlenmiştir. Ardından hedef kalınlığının balistik başarıma etkisini gösterebilmek için 5 farklı alan yoğunluğu sabit tutularak tüm numuneler 5 farklı kalınlıkta hazırlanmıştır. Sonra her bir atış beş kez tekrarlanarak toplamda 525 atış yapılmıştır. Bunların ardından, en yüksek başarımları gösteren ~53 HRC sertlikteki AISI 4340 numunesin önüne seramik koyularak katmanlı şekilde denenmiştir. Balistik deneyler Kırıkkale Silahsan Silah Fabrikası A.Ş. atış poligonlarında 7,62 mm'lik zırh delici mermilerle gerçekleştirilmiştir. Deneyler sırasında mermi giriş ve çıkış hızları ölçülmüş ve deneylerden sonra başarılı olan ve olmayan tüm numuneler makro ve mikro olarak incelenerek hasar mekanizmaları ve balistik başarımları etkileyen etmenler belirlenmiştir. Bu çalışmada en yüksek balistik başarımları katmanlı kompozitler sergilerken, bütüncül zırh malzemeleri içinde en iyi başarımları ~53 HRC sertlikteki AISI 4340 numunesi göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Balistik deney, Zırh delici mermi, Zırh malzemeleri.

INVESTIGATION ON THE BALLISTIC PERFORMANCE OF METALLIC AND LAMINATED COMPOSITE MATERIALS AGAINST 7.62 mm ARMOUR PIERCING PROJECTILES

ABSTRACT

Ballistic performance of engineering materials should be known in selection of the most suitable armor material to protect civilian or military system with the lowest possible weight against various threats. In this study, various engineering materials such as steels (AISI 1050, AISI 4140 ve AISI 4340), aluminum alloys (AA 5083 and AA 7075) and laminated composites were investigated experimentally. Steel specimens with the exception of AISI 1050 were tested in four different heat treatment conditions (different mechanical properties), and AA 7075 was also tested in three different heat treatment conditions. Four different hardness values, namely 40, 50, 55, 60 HRC were tried to be achieved based on four different heat treatment conditions for steel specimens. Three different heat treatment condition; Annealing (T0), aging (T651) and over aging (T7351) were applied to AA 7075. AISI 1050 and AA 5083 were tested directly in as received condition from the market. Moreover, mechanical properties of all tested materials were determined before the ballistic tests. Then, in order to show the effect of thickness, five different areal densities were kept constant and specimens were prepared in five different thicknesses. After that, all tests were repeated five times and 525 experiments were completed in total. Furthermore, AISI 4340, which exhibited the best ballistic performance with the hardness of ~53 HRC, was tested with ceramic tile as front material. Ballistic tests were performed with 7.62 mm AP projectiles at the polygons of Kırıkkale Silahsan Silah Fabrikası A.Ş. Projectile's entrance and exit velocities were measured during the tests and in order to exhibit the factors affecting the ballistic performance and failure mechanisms studies the successful and unsuccessful armor specimens are investigated in macro and micro scale after ballistic tests.

Key Words: Ballistic test, Armor piercing projectile, Armor materials.

İçindekiler

BÖLÜM 1 Giriş	23
BÖLÜM 2 Balistik	25
2.1. İç Balistik	25
2.2. Dış Balistik	26
2.3. Terminal Balistik	26
BÖLÜM 3 Zırh Çeşitleri ve Malzemeleri	28
3.1. Bütüncül Zırhlar	28
3.2. Kompozit Zırhlar	30
3.2.1. Plastik Esaslı Kompozit Zırhlar	30
3.2.1.1. Plastik Esaslı Kompozit Zırhlarda Başarımı Etkileyen Faktörler	31
3.2.1.1.1. Mermi geometrisi ve hızının etkisi	31
3.2.1.1.2. Darbe sönümlenme kabiliyeti	32
3.2.1.1.3. Kumaş zırhlar için parçacık mukavemetlendirmesi.....	33
3.2.1.1.4. Katmanlar arasındaki yapıştırma yüzeyinin etkisi	34
3.2.1.1.5. Eğiklik etkisi	34
3.2.1.1.6. Çevre şartlarının etkisi.....	34
3.2.1.1.7. Katman sayısının etkisi	35
3.2.1.1.8. Dokuma kumaşlarda örgü şeklinin etkisi	35
3.2.1.1.9. Basınç aktarımı	36
3.2.2. Seramik Esaslı Katmanlı Zırhlar	37
3.2.2.1. Hasar Mekanizmaları.....	37
3.2.2.2. Seramik Esaslı Zırh Tasarımı	38
3.2.2.2.1. Seramik Malzeme Seçimi	39
3.2.2.2.2. Destek Katman Seçimi.....	40
3.2.2.2.3. Bağ ve Empedans Etkileri	40
3.2.2.2.4. Uygun Seramik/Arka Katman Kalınlık Oranı.....	42
3.2.2.2.5. Eğiklik Etkisi	42
BÖLÜM 4 Deneysel Yöntem	43
4.1. Numunelerin Hazırlanması.....	43
4.2. Numunelerin Isıl İşlemlerinin Yapılması	45
4.3. Numunelerin Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi.....	46
4.4. Numunelerin İçyapı incelemeleri	47
4.5. Deney Düzeneklerinin Hazırlanması.....	47
4.6. Balistik Deneylerin Gerçekleştirilmesi.....	50
4.7. Balistik Olarak Denenen Numunelerin İncelenmesi.....	51
BÖLÜM 5 Deneysel Sonuçlar ve Değerlendirme	53
5.1. Mekanik özellikler	53
5.2. İçyapı İncelemesi	56
5.3. Balistik Deneyler Sonrası Makro İnceleme.....	62
5.4. Hasar Mekanizmaları.....	91
5.5. Deney Sonrası Oluşan Deliklerin Mikro İncelemesi	96

5.6. Mermi Çıkış Hızları.....	106
5.7. Çarpışma Bölgesi ve Kesitindeki İncelemeler	110
Adyabatik Kayma Bantlarının İncelenmesi.....	112
BÖLÜM 6 Analitik Yöntemlerin Bütüncül Zırhlar İçin İncelenmesi.....	129
6.1. Lambert Modeli	129
6.2. Madhu Modeli.....	130
6.3. Gupta Modeli.....	130
6.4. Woodward Modeli	132
6.5. Thompson Modeli	133
6.6. Übeyli ve Demir Modeli.....	134
BÖLÜM 7 Sayısal Benzetim Çalışmaları	138
7.1. Teori.....	138
7.1.1. Lagrange Çözücüsü	139
7.1.2. Malzeme Modeli.....	142
7.1.3. Hal Denklemi (EOS)	144
7.1.4. Dayanım ve Kırılma Modeli	145
7.1.5. Aşınma Gerinimi	147
7.2. Hedef Modellenmesi ve Benzetimler	148
7.2.1. AISI 1050 (0A)	149
7.2.2. AISI 4140.....	154
7.2.3. AISI 4340.....	154
7.2.4. DIN 100Cr6	178
7.2.5. AA 5083	182
7.2.6. AA 7075	186
BÖLÜM 8 Sonuç ve Öneriler	194
KAYNAKLAR	198
PROJE ÖZET BİLGİ FORMU.....	201

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.1. Alan yoğunluklarına karşılık gelen kalınlıklar.	25
Çizelge 4.2. Tüm malzeme grupları için uygulanan ısıtma işlem değerleri.	26
Çizelge 4.6. 7,62 mm'lik zırh delici merminin bazı özellikleri.	32
Çizelge 5.1.1. Numunelerin sertlik ve standart sapma değerlerinin gösterilmesi.	34
Çizelge 5.1.2. Numunelerin akma, çekme dayanımları ve süneklik % uzama değerleri.	35
Çizelge 5.1.3. Numunelerin darbe deneyleri sonucunda yuttukları enerji değerleri.	36
Çizelge 5.1.4. Alüminanın mekanik özellikleri.	37
Çizelge 5.3. Deneylerde kullanılan Tüm malzeme grupları için balistik başarımın gösterilmesi.	72
Çizelge 5.7.1(a). 1. Grup numunelerde oluşan bant tipleri ve ortalama bant genişliği.	104
Çizelge 5.7.1(b). 2. Grup numunelerde oluşan bant tipleri ve ortalama bant genişliği.	105
Çizelge 5.7.1(c). 3. Grup numunelerde oluşan bant tipleri ve ortalama bant genişliği.	106
Çizelge 5.7.2(a). 1. Grup numuneler için bantların çeşitlerine göre ve ana metalin mikro sertlik değerlerinin sunulması.	110
Çizelge 5.7.2(b). 2. Grup numuneler için bantların çeşitlerine göre ve ana metalin mikro sertlik değerlerinin sunulması.	111
Çizelge 6.1. Balistik olarak tam korumayı sağlayan kalınlıkların ve modellerde hesaplanan kalınlıkların tüm numune gruplarına göre gösterimi.	119
Çizelge 7.1.3.1. Malzeme özellikleri (hal denklemi)	144
Çizelge 7.1.4.1. Çekirdek için dayanım modeli sabitleri	146
Çizelge 7.1.4.2. Kılıf ve burun malzemeleri için dayanım modeli sabitleri	147
Çizelge 7.2.1.2 AISI 1050 çeliği için malzeme modeli verileri	150
Çizelge 7.2.3.1. 4 Farklı Sertlik Değeri İçin AISI 4340 Çeliği Johnson ve Cook Dayanım Modeli Parametreleri	156

Çizelge 7.2.3.2 AISI 4340 Çeliği Doğrusal Hal Denklemi Parametreleri	156
Çizelge 7.2.4.1 3A Hedef malzemesi için dayanım modeli sabitleri	178
Çizelge 7.2.5.1 AA5083 H111 çeliği için malzeme modeli verileri	182
Çizelge 7.2.6.1 6B Numunesi Dayanım Model Parametreleri	186

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. 13.yy Türk zırhı. Döneminin en iyi korumasını sağlamıştır. Örgü şeklinde olması toplam zırh ağırlığının düşük olmasını sağlamıştır. Hiçbir kılıç darbesi ile hasar görmemiştir.	2
Şekil 2.2.1. Mermi üzerine etki eden kuvvetlerin gösterilmesi.	4
Şekil 3.2.1. Kullanılan mermi geometrileri. Soldan sağa doğru sivri kemerli, yarı küresel, konik ve silindirik mermi geometrileri.	11
Şekil 3.2.2. Farklı geometrilerdeki mermilerin hasır örgü karbon elyaf takviyeli bir kumaşı nasıl deldiğinin gösterimi.	11
Şekil 3.2.3. Yapısal zırhın şematik gösterimi. En üstte yarı esnek kompozitten zemin yükleme katmanı, ortada cam seramik ve mermiyle ilk temasın olduğu alt katmanda alüminyum levha gösterilmiştir.	13
Şekil 3.2.4. Çeşitli süre ve etkilerde şartlandırılmış ve gama ışınına maruz bırakılmış numunelerin test sonrası görüntüleri.	15
Şekil 3.2.5. Hasır örgü durumunda kumaşın nasıl davrandığının sayısal modelde gösterimi.	16
Şekil 3.2.6. Soda-kireç camı ile merminin çarpıştığı andan itibaren ilk birkaç mikro saniye içindeki hasar mekanizmasının gösterimi. Şekilde ilk 12 görüntü 5 µs de bir son 3 görüntü ise 15 µs de bir alınmıştır. Malzemenin darbeye olan tepkisinin konik şekilde olduğu görülmektedir.	18
Şekil 3.2.7. Katmanlı kompozitin ve yapıştırma yüzeyinin temsili gösterimi.	21
Şekil 3.2.8. Deney sonrası arka destek katmanının kesiti.	22
Şekil 4.1. Hazırlanan numune geometrilerinin çizgesel gösterimi.	24
Şekil 4.5.1. Deney düzeneğinin çizgesel gösterimi.	29
Şekil 4.5.2. Hedef düzeneğinin genel görünümü.	29
Şekil 4.5.3. Hedef düzeneğin yan görünüşü ve gerdirme yaylarının gösterimi.	30
Şekil 4.5.4. Sabit levha üzerinde fatura şekli ve yerleşmiş numunenin gösterimi.	31
Şekil 4.6. 7,62 mm 'lik Zırh Delici Merminin çizgesel gösterimi ve temel bileşenleri.	32

Şekil 4.7.1. Numunelerde incelenen bölgenin simgesel gösterimi.	33
Şekil 4.7.2. Numunelerde mikro sertlik alınan noktaların gösterimi.	33
Şekil 5.2.1. 1050 çeliğine ait içyapı resimleri. (a) Işık mikroskopu görüntüsü X200, %5'lik nital dağlayıcı ile 15 s dağlanmış.	
Tane sınırlarında ferrit yapı tane içinde pörlit yapı görülmektedir.	
(b) Taramalı elektron mikroskopu görüntüsü X5000, %5'lik nital dağlayıcı ile 15 s dağlanmış yapıda siyah bölgeler ferrit katmanlı yapılar pörlit yapıdadır. Tane içinde ferrit-sementit katmanlarından oluşan pörlit yapı net şekilde görülmektedir.	38
Şekil 5.2.2. 4340 numunelerinin ışık mikroskopu görüntüleri.	
Tüm numunelerde temperlenmiş martenzit yapı görülmektedir.	40
Şekil 5.2.3. 4340 numunelerinin taramalı elektron mikroskopu görüntüleri. Tüm numunelerde menevişlenmiş martenzit görülmektedir	
(a) 40HRC, (b) 50 HRC, (c) 60 HRC.	41
Şekil 5.2.4. Alüminyum alaşımı 5083'ün içyapı görünümü.	42
Şekil 5.2.5. AA7075'in yaşlandırılmış koşuldaki (T651) ve aşırı yaşlandırılmış koşullardaki (T7351) içyapı görüntüleri.	42
Şekil 5.3.1. 0A numunelerinin deney sonrası görüntüleri. (a)-(e) sırasıyla 1.-5. alan yoğunluklarına sahip numuneler.	43
Şekil 5.3.2. 1A numunelerinin deney sonrası görüntüleri.	
En düşük alan yoğunluğundan (a), en yüksek alan yoğunluğuna (e) numunelerin gösterimi.	44
Şekil 5.3.3. 1B numunelerinin deney sonrası görüntüleri.	
Kalınlık artıkça kırılmış parça sayısı azalmaktadır. (Soldan sağa sırasıyla 1., 2., 3., 4. ve 5. alan yoğunluklarındaki numuneler.)	45
Şekil 5.3.4. 1C numunelerinin deney sonrası görüntüleri.	
4. ve 5. alan yoğunluklarında bakır gömleğin sıyrıldığı bölge kırmızı daire içinde gösterilmiştir. (Soldan sağa sırasıyla 1., 2., 3., 4. ve 5. alan yoğunluklarındaki numuneler.)	45
Şekil 5.3.5. 1D numunelerinin deney sonrası görüntüleri. Numune kalınlığı arttıkça kırılma sonrası oluşan parçacık sayısı azalmaktadır. (Soldan sağa sırasıyla 1. , 2. , 3. ve 4. alan yoğunluklarındaki numuneler.)	46
Şekil 5.3.6. 1D numunesinin 5. alan yoğunluğundaki deney	

sonrası görüntüsü. Numune kırılmamış ve delinmemiştir.	
Arka yüzünde çatlak oluşmazken (ortada), mermi çekirdeği parçalanmıştır (solda).	47
Şekil 5.3.7. 2A numunelerinin deneyler sonrasındaki görünüşleri. Sırasıyla (a)'dan (e)'ye 1.'den 5. alan yoğunluğuna numuneler.	47
Şekil 5.3.8. 2A numunelerinde 4. ve 5. alan yoğunluklarında karşılaşılan delinmeme durumlarının gösterilmesi. (a) 'da mermi hedef çarpışmasından sonra merminin diklik etkisini yitirip eğik olarak numuneye girmeye çalıştığı görülmekteyken, (b) ve (c)'de ise 5. alan yoğunluğunda hedefin diğer tarafından ucu çıkan (b) ve kırılan (c) mermi çekirdeği gösterilmiştir.	48
Şekil 5.3.9. 2B numunelerinin deney sonrası 1. alan yoğunluğundan(a) 5. alan yoğunluğuna sırasıyla ön yüz görüntüleri.	49
Şekil 5.3.10. 2B numunelerinin deney sonrası 1. alan yoğunluğundan(a) 5. alan yoğunluğuna sırasıyla arka yüz görüntüleri. 2. alan yoğunluğunda çok daha derin çatlaklar oluşurken 3. alan yoğunluğunda iki yönlü ve daha sığ çatlak oluşmuş, 4. alan yoğunluğunda tek yönlü derin olmayan çatlak oluşmuş ve nihayet 5. alan yoğunluğunda çatlak oluşmamıştır.	49
Şekil 5.3.11. 2C numunelerinin en düşük alan yoğunluğundan (a) en yüksek alan yoğunluğuna (d) doğru sıralanmış balistik deneyler sonucundaki ön ve arka yüz görünüşleri. İlk iki alan yoğunluğundaki numuneler delinmeyip bir çok parçaya kırılarak başarısız olurken (a ve b), son üç alan yoğunluğunda numuneler delinmemiş ve kırılmamıştır (c ve d). 3. alan yoğunluğunda numunelerin ön ve arka yüzlerinde derin olmayan çatlaklar görülmüştür (c).	50
Şekil 5.3.12. 2D numunelerinin düşük alan yoğunluğundan (a) en yüksek alan yoğunluğuna (d) doğru sıralanmış balistik deneyler sonucundaki ön ve arka yüz görünüşleri. İlk iki alan yoğunluğundaki numuneler delinmeyip birçok parçaya kırılarak başarısız olurken (a), son üç alan yoğunluğunda numuneler delinmemiş ve kırılmamıştır (b, c ve d). 3. alan yoğunluğundan itibaren numunelerin ön ve arka yüzlerinde çatlak görülmemiştir.	51
Şekil 5.3.13. 3A numunelerinin en düşük alan yoğunluğundan (a) en yüksek	

alan yoğunluğuna (e) doğru sıralanmış balistik deneyler sonucundaki görünüşleri. (e) hariç tüm numuneler sünek şekilde delinirken (e) delinmemiş ancak numunenin n yüzünde de derin çatlaklar oluşmuştur.	52
şekil 5.3.14. 3A numunelerinin deney sonrası arka yüzlerinin görünümleri. İlk üç alan yoğunluğunda (a-c) sünek delinme gerçekleşirken son iki alan yoğunluğunda (d-e) numune delinmemiştir. (f)'de oluşan derin çatlak resmedilmiştir.	53
şekil 5.3.15. 3B numunelerinin 1. alan yoğunluğundan (a) 5. alan yoğunluğuna (e) kadar deney sonrası n yüz görüntüleri ile (e)'de A detayı ile çarpışma yüzeyine sıvanmış bakır gömlek sunulmuştur.	54
şekil 5.3.16. 3B numunelerinin 1. alan yoğunluğundan (a) 5. alan yoğunluğuna (e) kadar deney sonrası arka yüz görüntüleri.	55
şekil 5.3.17. 3C numunelerinin en düşük alan yoğunluğundan (a) en yüksek alan yoğunluğuna (e) doğru sıralanmış balistik deneyler sonucundaki n yüz görünüşleri. 5.alan yoğunluğu hariç tüm numuneler delinmemiş ancak kırılarak başarısız olmuştur (a b, c ve d). 5.Alan yoğunluğunda yalnızca bir numune başarılı olmuştur. (e)	56
şekil 5.3.18. 3D numunelerinin düşük alan yoğunluğundan (a) en yüksek alan yoğunluğuna (d ve e) doğru sıralanmış balistik deneyler sonucundaki n yüz görünüşleri. 5.alan yoğunluğu hariç tüm numuneler delinmemiş ancak kırılarak başarısız olmuştur (a, b ve c). 5.Alan yoğunluğunda atışı yapılan 5 numuneden 3' başarılı olmuştur. (d ve e)	57
şekil 5.3.19. 4A numunelerine ait balistik deneyler sonrası n yüz görüntüleri. Tüm alan yoğunlularındaki numuneler tam koruma sağlamıştır. Seramik katman parçalanmıştır ancak destek elik katman merminin geçmesine izin vermemiştir.	58
şekil 5.3.20. 4A numunelerinin 1. alan yoğunluğundan (a) 5. alan yoğunluğuna (e) kadar deney sonrası arka yüz görüntüleri.	59
şekil 5.3.21. Zırh delici mermi çarptıktan sonra katmanlı kompozit zırhın görüntüsü. Seramik katman parçalanıp destek katmandan ayrılırken destek katman balistik korumayı sağlamıştır.	59
şekil 5.3.22. 4A grubu zırhlarda balistik deneyler sonrasında oluşan şişme tepeliklerinin a)55 ve b)70 kg/m ² alan yoğunluğundaki	

numuneler için gösterimi. Artan alan yoğunluğu ile birlikte şişme miktarı da azalmıştır.	60
Şekil 5.3.23. 4B numunelerinin balistik deneyler sonrasındaki görüntüleri. 1.alan yoğunluğunda numunelerden üçü (a)'da görüldüğü gibi sünek şekilde delinmiştir.	61
Şekil 5.3.24. 4C grubu numuneler için balistik deneyler sonrası arka yüz görüntülerinin sunulması. En düşük alan yoğunluğundan (a), en yüksek alan yoğunluğuna doğru sıralanmış numuneler. İlk iki alan yoğunluğunda arka yüzde beliren çatlaklar görülmektedir.	62
Şekil 5.3.25. 4D numunelerinin balistik deneyler sonrası ön yüz görüntüleri. 1.alan yoğunluğundan (a), 5.alan yoğunluğuna (e) kadar sıralanmış numuneler. 1. Alan yoğunluğunda delinmemiş ancak kırılmış numunenin resmi verilmiştir.	63
Şekil 5.3.26. 5. alan yoğunluğundaki 5A numunesinde bakır gömlek sıyrılmasının kesit üzerinde gösterimi. Kırmızı ile işaretlenen bölge sıvanan bakır gömleğe aittir.	64
Şekil 5.3.27. (a) ve (b) 'de 5A numunesinde gözlemlenen sünek delinme örneklenmiştir. (c)'de ise bu deneyler sırasında kullanılan ve hasar görmemiş bir mermi çekirdeği sunulmuştur.	64
Şekil 5.3.28. (a)'dan (e)'ye doğru sırasıyla 1. , 2. , 3. , 4. ve 5. alan yoğunluklarına sahip numunelerin balistik testler sonucundaki ön yüz görüntüleri. Tüm numuneler sünek şekilde delinmiştir.	65
Şekil 5.3.29. (a)'dan (e)'ye doğru sırasıyla 1. , 2. , 3. , 4. ve 5. alan yoğunluklarına sahip numunelerin balistik testler sonucundaki arka yüz görüntüleri. Tüm numuneler sünek şekilde delinmiştir.	66
Şekil 5.3.30. 6B numunesinin deney sonrası görüntüsünde A detayında mermi giriş bölgesindeki katmanlı ayrılma, B detayında ise delinmeyen numunelerin arka yüzünde gerçekleşen şişme verilmiştir.	67
Şekil 5.3.31. 6B numunelerinin balistik deneyler sonrasındaki ön yüz görüntülerinin en düşük alan yoğunluğundan (a), en yüksek alan yoğunluğuna doğru sunulması.	67
Şekil 5.3.32. 6B numunelerinin balistik deneyler sonrasındaki arka yüz görüntüleri. En düşük alan yoğunluğundan(a), en yüksek alan yoğunluğuna (e) doğru sıralanmış numuneler. 3. alan yoğunluğundan itibaren	

numuneler delinmemiştir. 3. alan yoğunluğunda numunenin arka yüzünde çatlak oluşumu gözlenmiştir.	69
Şekil 5.3.33. Üçüncü (a), dördüncü (b) ve beşinci (c) alan yoğunluklarında balistik deneylerden sonra kesiti alınan numunelerde merminin batma derinliği. Tüm alan yoğunluklarında yaklaşık olarak aynı derinlikte mermi ilerlemiştir. (Ölçek mm cinsindedir.)	70
Şekil 5.3.34. 6C numuneleri için (a)'da A detayı ile arka yüzünde belirlenen çatlak, (b)'de ise B detayı ile numune içinde kırılan mermi çekirdeği gösterilmiştir.	70
Şekil 5.3.35. 6C numunelerinin balistik deneyler sonrasındaki arka yüz görüntülerinin verilmesi. 1. alan yoğunluğundan 5. alan yoğunluğuna doğru sıralanmış numuneler. İlk üç alan yoğunluğunda numuneler delinirken 4. Alan yoğunluğunda numune delinmemiş fakat arka yüzünde çatlak oluşmuştur. 5. alan yoğunluğunda numune arka yüzünde herhangi bir çatlak oluşmamıştır.	71
Şekil 5.4.1. Metaller için hasar mekanizması çeşitleri [7]. (a) sünek delinme örneği, (b) çukur tipi delinme ve (c) zimba etkisiyle delinme.	73
Şekil 5.4.2. Sünek delinen 1A numunesinde mermi giriş bölgesinde gömleğin sıyrılması sonucu oluşan çukurun (A detayı) ve çıkış yönünde akışa zorlanan malzemenin (B detayı) gösterilmesi.	74
Şekil 5.4.3. 4B1 grubu numunelerde görülen çukur tipi delik oluşumu hasar mekanizmasının sunulması. Seramik katmanın kırılması ile birlikte ince sayılabilecek destek katmanının mermi tarafından delinmesi çukur oluşturacak şekilde gerçekleşmiştir.	75
Şekil 5.4.4. Gevrek delinen 2B numunesinde mermi giriş bölgesinde sıyrılmanın etkisinin olmadığı ve çıkış yönünde genişlemenin gösterilmesi.	76
Şekil 5.4.5. Sünek alüminyum numunesi 6A'da mermi hareket yönünde bakır gömlek sıyrılması sonucu kesit daralması ve yine aynı nedenden mermi giriş bölgesindeki şişmenin gösterimi.	77
Şekil 5.4.6. 3C grubu numunelerde ani ve tahmin edilemez kırılma şeklinin gösterimi. Diğer modellerde gösterilenin dışında numune çok gevrek olduğu durumlarda mermi geçmesine izin vermese de kendisi parçalanarak dağılmaktadır.	77

Şekil 5.5.1. Sünek ve gevrek delinen numune örneklerinin SEM görüntüleri. (a) Sünek delinen numunede mermi giriş bölgesinde genişleme ve çıkış bölgesinde taç yaprakları gibi açılmış bir yapı gözlemlenmektedir. (b) Gevrek delinen numunede ise mermi hareket yönüne paralel malzeme sürüklenmesi ve daha parlak bir yüzey görülmektedir.	79
Şekil 5.5.2. Sünek delinmede oluşan çatlak bölgesinin yüksek büyütmelelerdeki görünüşü. (X100) Çatlak mermi hareket yönünde ilerlemiş ve hareket yönünde dik kısa çatlak ilerlemeleri de gözlemlenmektedir.	80
Şekil 5.5.3. 1C4–2 numunesinin balistik deney sonrası görüntüsünün modeli. A harfi ile gösterilen parçanın kesilmemiş kırık yüzeyi taramalı elektron mikroskopunda incelenmiştir.	80
Şekil 5.5.4. 1C2–3 numunesinin balistik deney sonrası görüntüsünün modeli. B harfi ile gösterilen parçanın kesilmemiş kırık yüzeyi taramalı elektron mikroskopunda incelenmiştir.	81
Şekil 5.5.5. A parçasında merminin çarpıp yapıştığı bölgenin gösterimi. Sol tarafta parçaya sonradan yapışmış gibi duran bölge mermi çekirdeğidir. Numunenin arka yüzünde oluşan derin çatlaklar görülmektedir.	82
Şekil 5.5.6. Mermi ile hedefin çarpışma yüzeyine yakın bir bölgede 1000 büyütmede elde edilen görüntü. Daire içine alınan parçacığın kurşun olduğu belirlenmiştir.	82
Şekil 5.5.7. Küresel parçacık üzerinden alınan EDS analizi sonucu.	83
Şekil 5.5.8. B parçasında şok dalgalarının gösterilmesi. Kırmızı ile işaretlenen bölge şok dalgalarının hareketlerini göstermektedir. Mermi şekildeki görüntünün sol alt köşesinden numuneye çarpmıştır.	84
Şekil 5.5.9. 1C2 grubu numunede B parçasının kırık yüzeyinde bulunan mermi ile hedef çarpışma yüzeyine yakın bölgedeki kırık yüzey görüntüsü ile çarpışma bölgesinden uzak bölgedeki kırık yüzeyin SEM görüntüsü. Her iki görüntüde de çukurlu bir yapı mevcutken çukurların büyüklükleri çok büyük farklılıklar göstermektedir.	85
Şekil 5.5.10. 2C grubu numune de kırık yüzeyinde bulunan mermi ile hedef çarpışma yüzeyine yakın bölgedeki kırık yüzey görüntüsü ile çarpışma bölgesinden uzak bölgedeki kırık yüzeyin SEM görüntüsü.	86

Şekil 5.5.11. 3C grubu numune de kırık yüzeyinde bulunan mermi ile hedef çarpışma yüzeyine yakın bölgedeki kırık yüzey görüntüsü ile çarpışma bölgesinden uzak bölgedeki kırık yüzeyin SEM görüntüsü.	87
Şekil 5.6.1. 0 grubu numuneler için alan yoğunluna karşılık gelen mermi çıkış hızları sunulmuştur. Alan yoğunluğunun artması mermi çıkış hızını düşürmüştür ancak yine de tüm numuneler delinmiştir.	88
Şekil 5.6.2. 1 grubu numuneler için elde edilen mermi çıkış hızlarının numunenin sertliğine ve alan yoğunluğuna bağlı olarak nasıl değiştiğinin sunulması. Genel olarak artan sertlik ve alan yoğunluğu mermi çıkış hızını düşürmüştür.	89
Şekil 5.6.3. 2 Grubu numunelerde balistik deneylerde mermi çıkış hızlarının sertlik ve alan yoğunluğuna bağlı olarak değişiminin gösterilmesi.	90
Şekil 5.6.4. 3 Grubu numunelerin mermi çıkış hızlarına zırh sertliğinin ve alan yoğunluğunun etkisi. Numuneler C ve D ısılı işlemlerinde delinmemesine rağmen kırılarak başarısız olmuştur.	90
Şekil 5.6.5. 5 grubu zırh malzemelerinin alan yoğunluğuna bağlı olarak balistik deneyler sırasında delinmeleri sonucu mermi çıkış hızlarının nasıl değiştiğinin gösterimi. Artan alan yoğunluğu ile mermi çıkış hızı düşmüştür.	91
Şekil 5.6.6. 6 Grubu numunelerde mermi çıkış hızına alan yoğunluğu ve ısı işlemin etkisi. Tavlanan numuneler (6A) delinirken, yaşlandırılan (6B) numuneler en iyi balistik başarıyı sergilemiştir. Aşırı yaşlandırmanın (6C) yaşlandırmaya göre bir fayda sağlamadığı gibi aksine başarıyı düşürmüştür.	92
Şekil 5.7.1. 2A numuneleri için mermi çarpma bölgesinden uzaklaştıkça sertliğin nasıl değiştiğinin gösterimi. Yüzeyde de derinde de mermi çarpma bölgesinde bölgesel olarak sertlik düşük uzaklaştıkça göreceli olarak yüksektir.	93
Şekil 5.7.2. 2B numuneleri için sertlik dağılımlarının verilmesi. Yüzeyde de derinde de sertlik çarpışma bölgesinde düşük, çarpışmaya uzak bölgelerde yüksektir. İç bölgelerde sertlik değerleri birbirlerine yüzeye oranla daha yakın değerlerdedir.	94
Şekil 5.7.3. 2D numunesinde mermi çarpma bölgesinden itibaren yüzeyde ve iç bölgelerde sertlik dağılımlarının sunulması.	95
Şekil 5.7.4. 1A Numunelerinde 1. alan yoğunluğundan (a), 5. alan yoğunluğuna	

- (e) kadar alan yoğunluğuna bağlı olarak bant yoğunluğunun nasıl değiştiğinin gösterimi. Alan yoğunluğunun artmasıyla oluşan bant şeklinde (dönüşmüş-bozulmuş) bir değişiklik olmamıştır ancak AKB yoğunluğu belirgin şekilde artmıştır. 97
- şekil 5.7.5. 1B Numunelerinde 1. alan yoğunluğundan (a), 5. alan yoğunluğuna (e) kadar alan yoğunluğuna bağlı olarak bant yoğunluğunun nasıl değiştiğinin gösterimi. Artan alan yoğunluğu ile AKB yoğunluğu da belirgin şekilde artmıştır. Hem bozulmuş bantlar hem de dönüşmüş bantlar açıkça görülmektedir. 98
- şekil 5.7.6. 1D Numunelerinde 1. alan yoğunluğundan (a), 5. alan yoğunluğuna (e) kadar alan yoğunluğuna bağlı olarak bant yoğunluğunun nasıl değiştiğinin gösterimi. Artan alan yoğunluğu ile AKB yoğunluğu da belirgin şekilde artmıştır. Hem bozulmuş bantlar hem de dönüşmüş bantlar açıkça görülmektedir. 99
- şekil 5.7.7. 2A Numunelerinde 1. alan yoğunluğundan (a), 5. alan yoğunluğuna (e) kadar alan yoğunluğuna bağlı olarak bant yoğunluğunun nasıl değiştiğinin gösterimi. Alan yoğunluğunun artmasıyla oluşan bant şeklinde (dönüşmüş-bozulmuş) bir değişiklik olmamıştır ancak AKB yoğunluğu göreceli olarak artmıştır. 100
- şekil 5.7.8. 2B Numunelerinde 1. alan yoğunluğundan (a), 5. alan yoğunluğuna (e) kadar alan yoğunluğuna bağlı olarak bant yoğunluğunun nasıl değiştiğinin gösterimi. Artan alan yoğunluğu ile AKB yoğunluğu da belirgin şekilde artmıştır. Hem bozulmuş bantlar hem de dönüşmüş bantlar görülebilmektedir. 101
- şekil 5.7.9. 2D Numunelerinde 1. alan yoğunluğundan (a), 5. alan yoğunluğuna (e) kadar alan yoğunluğuna bağlı olarak bant yoğunluğunun nasıl değiştiğinin gösterimi. Artan alan yoğunluğu ile AKB yoğunluğu da belirgin şekilde artmıştır. Hem bozulmuş bantlar hem de dönüşmüş bantlar açıkça görülmektedir. 102
- şekil 5.7.10. 0A numunelerinde genel olarak gözlenen bozulmuş bantların sunulması. Genel yapı pörlit, ana yapı içinde yüksek şekil değiştirme hızına bağlı olarak oluşan bozulmuş bantların gösterimi. 103
- şekil 5.7.11. 1A numunelerinde çok nadir rastlanan dönüşmüş bant oluşumu. 107

Şekil 5.7.12. 1A numunelerinde sıkça rastlanan bozulmuş bant oluşumu. Ana yapı bozulmuş martenzit, bant ile ana yapı arasında yapısal farklılık olmamasına rağmen martenzit çitalarında yönelim farklılıklarından kaynaklanan karşıtlık farklılıkları vardır.	107
Şekil 5.7.13. Yüksek sertliğe sahip 1D5 numunesinde gözlemlenen dönüşmüş ve bozulmuş bantların bir arada olduğu yapı.	108
Şekil 5.7.14. 1D5 numunesinde dönüşmüş bant ve çatlak oluşumunun birlikte gösterimi. Çatlak oluşumu ve kırılma başlangıcı dönüşmüş bant üzerinde başlamış.	108
Şekil 5.7.15. Dönüşmüş bant içyapısının elektron mikroskopu görüntüsü. (a)'da içyapıdaki çok küçük taneler ve çökelti görülmektedir. (b)'de ise bu çökelti büyüklükleri belirlenmiştir. Genel olarak yaklaşık $\sim 1\mu\text{m}$ çaplı çökelti gözlemlenmiştir.	109
Şekil 5.7.16. EDS element incelemesi sonucu. Çökeltinin bir karbür olma olasılığı yüksektir.	110
Şekil 7.1.1.1. Hücre Şekil Değiştirmesi	139
Şekil 7.1.1.2. Eski hücre > hacimdeki değişiklik + şekildeki değişiklik	139
Şekil 7.1.2.1. İki boyutlu bir hücre; toplam gerilim gerilim > hidrostatik gerilim + sapma gerilimi	143
Şekil 7.1.4.1. Von Mises gerilmeleri	147
Şekil 7.2.1. Mermi Modeli	148
Şekil 7.2.1.1. Mermi ve plakanın çarpma anındaki modelleri (0A5)	150
Şekil 7.2.1.2. Mermi ve plakanın çarpma anındaki modelleri (0A5)	151
Şekil 7.2.1.3. Benzetim sonunda mermi ve plaka (0A5)	151
Şekil 7.2.1.4. Plakanın son hali (kesit) ve plakanın arka yüzü (0A5)	152
Şekil 7.2.1.5. Plakanın benzetim sonundaki sıcaklık dağılımı (0A5)	153
Şekil 7.2.1.6. Merminin kinetik enerji bilançosu (çekirdek malzemesi olan 100Cr6 esas alınmıştır)	153
Şekil 7.2.3.1. AISI 4340 Çeliğinin Farklı Temperleri İçin σ_0 Değerinin Rockwell C Sertlik Değerine Göre Değişimi	155
Şekil 7.2.3.2. 2A-4 Atış Öncesi Görünüm	157
Şekil 7.2.3.3. 2A-4 Atış Öncesi Görünüm	158
Şekil 7.2.3.4. 2A-4 Atış Sonrası Görünüm	158

Şekil 7.2.3.5. 2A-4 Atış Sonrası Görünüm	158
Şekil 7.2.3.6. 2A-4 Atış Sonrası Görünüm (Yalnızca Hedef)	159
Şekil 7.2.3.7. 2A-4 Atış Sonrası Görünüm (Yalnızca Hedef)	159
Şekil 7.2.3.8. 2A-4 Atış Sonrası Hedefteki Sıcaklık Dağılımı	159
Şekil 7.2.3.9. 2A-4 Mermi Çekirdeği Kinetik Enerji Bilançosu	160
Şekil 7.2.3.10. 2A-5 Atış Öncesi Görünüm	160
Şekil 7.2.3.11. 2A-5 Atış Öncesi Görünüm	161
Şekil 7.2.3.12. 2A-5 Atış Sonrası Görünüm	161
Şekil 7.2.3.13. 2A-5 Atış Sonrası Görünüm	161
Şekil 7.2.3.14. 2A-5 Atış Sonrası Görünüm (Sadece Hedef)	162
Şekil 7.2.3.15. 2A-5 Atış Sonrası Görünüm (Sadece Hedef)	162
Şekil 7.2.3.16. 2A-5 Hedefteki Sıcaklık Dağılımı	163
Şekil 7.2.3.17. 2A-5 Mermi Çekirdeği Kinetik Enerji Bilançosu	163
Şekil 7.2.3.18. 2B-1 Numunesi Atış Öncesi Kesit Görünümü	164
Şekil 7.2.3.19. 2B-1 Numunesi Atış Öncesi Kesit Görünümü	164
Şekil 7.2.3.20. 2B-1 Numunesi Atış Sonrası Kesit Görünümü	165
Şekil 7.2.3.21. 2B-1 Numunesi Atış Sonrası Kesit Görünümü	165
Şekil 7.2.3.22. 2B-1 Numunesi Atış Sonrası Kesit Görünümü (Sadece Hedef)	165
Şekil 7.2.3.23. 2B-1 Numunesi Atış Sonrası Bütün Görünüm	166
Şekil 7.2.3.24. 2B-1 Numunesi Mermi Çekirdeği Kinetik Enerji Bilançosu	166
Şekil 7.2.3.25. 2B-1 Numunesi Atış Sonrası Hedefteki Sıcaklık Dağılımı	167
Şekil 7.2.3.26. 2B-2 Numunesi Atış Öncesi Kesit Görünümü	167
Şekil 7.2.3.27. 2B-2 Numunesi Atış Öncesi Kesit Görünümü	168
Şekil 7.2.3.28. 2B-2 Numunesi Atış Sonrası Kesit Görünümü	168
Şekil 7.2.3.29. 2B-2 Numunesi Atış Sonrası Kesit Görünümü	168
Şekil 7.2.3.30. 2B-2 Numunesi Atış Sonrası Görünümü	169
Şekil 7.2.3.31. 2B-2 Numunesi Mermi Çekirdeği Kinetik Enerji Bilançosu	169
Şekil 7.2.3.32. 2B-2 Numunesi Atış Sonrası Hedefteki Sıcaklık Dağılımı	170
Şekil 7.2.3.33. 2C-1 Numunesinin Atış Öncesi Görünümü	171
Şekil 7.2.3.34. 2C-1 Numunesinin Atış Öncesi İzometrik Görünümü	171
Şekil 7.2.3.35. 2C-1 Numunesinin Atış Sonrası Görünümü	172
Şekil 7.2.3.36. 2C-1 Numunesinin Atış Sonrası İzometrik Görünümü	172
Şekil 7.2.3.37. 2C-1 Modeli Hedef Plakasının Atış Sonrası Görünümü	173

Şekil 7.2.3.38. 2C-1 Modeli, Mermi Çekirdeği Kinetik Enerji Bilançosu	173
Şekil 7.2.3.39. 2C-1 Modeli, Mermi Çekirdeğinin Ortalama Hızı (Atış –z yönünde yapılmıştır)	174
Şekil 7.2.3.40. 2D-1 Numunesinin Atış Öncesi Görünümü	174
Şekil 7.2.3.41. 2D-1 Numunesinin Atış Öncesi İzometrik Görünümü	175
Şekil 7.2.3.42. 2D-1 Numunesinin Atış Sonrası Görünümü	175
Şekil 7.2.3.43. 2D-1 Numunesinin Atış Sonrası İzometrik Görünümü	176
Şekil 7.2.3.44. 2D-1 Modeli Hedef Plakasının Atış Sonrası Görünümü	176
Şekil 7.2.3.45. 2D-1 Modeli, Mermi Çekirdeği Kinetik Enerji Bilançosu	177
Şekil 7.2.3.46. 2D-1 Modeli, Mermi Çekirdeğinin Ortalama Hızı (Atış –z yönünde yapılmıştır)	177
Şekil 7.2.4.1. 3A4 numunesi benzetim öncesi görüntü	179
Şekil 7.2.4.2. 3A4 numunesi benzetim sonrası görüntü (kesit)	179
Şekil 7.2.4.3. 3A4 numunesi benzetim sonrası görüntü	179
Şekil 7.2.4.4. 3A4 sayısal benzetim sonucu oluşan mermi çekirdeği kinetik enerji değişimi	180
Şekil 7.2.4.5. 3A5 numunesi sayısal benzetim öncesi görüntü	180
Şekil 7.2.4.6. 3A5 numunesi sayısal benzetim sonrası görüntü	181
Şekil 7.2.5.1. Plaka ve merminin çarpma anındaki durumu (5A5)	182
Şekil 7.2.5.2. Plaka ve merminin çarpma anındaki durumu (5A5)	183
Şekil 7.2.5.3. Benzetim sonunda mermi ve plaka (5A5)	183
Şekil 7.2.5.4. Plakanın son hali (kesit) (5A5)	184
Şekil 7.2.5.5. Plakanın son hali (plakanın arka yüzü) (5A5)	184
Şekil 7.2.5.6. Plakanın benzetim sonundaki sıcaklık dağılımları (5A5)	185
Şekil 7.2.5.7. Merminin kinetik enerji bilançosu (çekirdek malzemesi olan 100Cr6 esas alınmıştır)	185
Şekil 7.2.6.1. 6B-2 Numunesinin Atış Öncesi Görünümü	187
Şekil 7.2.6.2. 6B-2 Numunesinin Atış Öncesi İzometrik Görünümü	188
Şekil 7.2.6.3. 6B-2 Numunesinin Atış Sonrası Görünümü	188
Şekil 7.2.6.4. 6B-2 Numunesinin Atış Sonrası İzometrik Görünümü	189
Şekil 7.2.6.5. 6B-2 Modeli, Mermi Çekirdeği Kinetik Enerji Bilançosu	189
Şekil 7.2.6.6. 6B-2 Modeli, Mermi Çekirdeğinin Ortalama Hızı (Atış –z yönünde yapılmıştır)	190

Şekil 7.2.6.7. 6B-3 Numunesinin Atış Öncesi Görünümü	190
Şekil 7.2.6.8. 6B-3 Numunesinin Atış Öncesi İzometrik Görünümü	191
Şekil 7.2.6.9. 6B-3 Numunesinin Atış Sonrası Görünümü	191
Şekil 7.2.6.10. 6B-3 Numunesinin Atış Sonrası İzometrik Görünümü	192
Şekil 7.2.6.11. 6B-3 Modeli, Mermi Çekirdeğinin Kinetik Enerji Bilançosu	192
Şekil 7.2.6.12. 6B-3 Modeli, Mermi Çekirdeğinin Ortalama Hızı (Atış -z yönünde yapılmıştır)	193

KISALTMALAR

Kısaltmalar Açıklama

AA	Alüminyum Alaşımı
RHA	Haddelenmiş Homojen Zırh
HRC	Rockwell-C Sertlik Birimi
HB	Brinell Sertlik Birimi
HV	Vickers Sertlik Birimi
EDS	Enerji Dağılım Spektroskopisi
SEM	Taramalı Elektron Mikroskopu
AKB	Adyabatik Kayma Bandı
FIB	Odaklanmış İyon Demeti

SEMBOL LİSTESİ

Bu çalışmada kullanılmış olan simgeler açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
δ ;	Merminin ekseni ile yaptığı açı
W ;	Yerçekimi kuvveti
R ;	Merminin hareket ettiği yöne bağlı bir hava kuvveti
d ;	Levhanın yoğunluğu
V_r ;	Merminin bağıl hızı
V_{BL} ;	Balistik korumanın sağlanabildiği en yüksek hız
M ';	Hedefin kütlesi
t ;	Hedefin kalınlığı
θ ;	Eğiklik açısı
θ_c ;	Kritik sekme açısı
t^* ,	Levha kalınlığı (balistik sınır)
k_2, k_3	Levha kalınlığı t 'nin fonksiyonları
D ,	Mermi çapı
σ_0 ,	Hedef malzeme için dinamik dayanım değeri
r_p ;	Merminin yarıçapı
m_p ;	Merminin kütlesi
σ_y ;	Hedef malzemesinin akma dayanımı
A ;	Mermi şekline bağlı bir sabittir. (konik için 1 ve yumru için 1,86)
L_n ;	Merminin uzunluğu
V_d ;	Normal çarpmadaki hız düşümü
V_0 ;	Merminin giriş hızı
h_o ;	Balistik tam koruma sağlayan hedef kalınlığı
σ_φ ;	Hedef malzemesinin akma dayanımı
T ;	Hesaplanan kalınlık ön değeri
ε ;	Yüzde süneklik değeri
u ;	Sünekliğe bağlı bir sabittir. (%süneklik 13'den büyükse, $u=2$, küçükse $u=3$ alınır.)

BÖLÜM 1

1.GİRİŞ

İnsanlık tarih boyunca kendini koruma ihtiyacı duymuştur. Bunun için taş ve sopaların kullanımı ile başlayan silahları geliştirmiştir. Silahlanmanın yayılması silah tehdidine karşı korunma ihtiyacını peşinden sürüklemiştir. Bu ihtiyaç insanı kalkan ve zırh kullanmaya itmiştir. Sert cisimlerle savaşıyan insanlık yine sert cisimlerle kendisini korumuştur. Savaşlar geçirmiş ve bu savaşlarda ürettiği silah ve zırh teknolojisini kullanmıştır. 13. yüzyılda kılıçla savaşıyan ya da kendisini koruyan insanoğlu yine bu dönemde tüm vücudunu saran çelik elbiseleri tehlikelere karşı kalkan olarak kullanmıştır. Şekil 1.1'de 13. yüzyılda Türklerin kullandığı ve Robinson [1]'a göre döneminin en önemli zırhı görülmektedir. Hızla gelişen silah teknolojisi barutun ve ateşli silahların icadıyla yeni bir boyut kazanmıştır. Silahların ağırlığı azalıp boyutları küçülürken etki ve menzilleri artmıştır. Buna paralel olarak gerek bina ve araç gerekse personel zırhında yüksek başarımlı ve düşük yoğunluk ihtiyacı kaçınılmaz olmuştur.

Zırh teknolojisinde metallerin çok önemli bir yeri vardır. Metaller çok uzun süre üzerlerinde çalışıldığından ve iyi bir teknolojik veri tabanına sahip olduklarından zırh malzemesi olarak yaygın şekilde kullanılmaktadır. Metallerin tokluk, mukavemet ve sertlik gibi mekanik özellikleri de zırh malzemesi olarak kullanılmalarında avantaj oluşturmaktadır [2]. Ancak metallerin yoğunlukları diğer mühendislik malzemelerine kıyasla yüksektir. Bu da zırhın ağır olmasına neden olmaktadır. Personelin ağır bir zırhı taşıması ve o ağırlıkla hızlı hareket etmesi oldukça güçtür. Aynı şekilde yüksek ağırlıktaki bir aracın hareket kabiliyeti de oldukça düşecektir. Bu yüzden hafif zırh üretimine büyük ihtiyaç vardır.

Hafif zırh üretimine duyulan ihtiyaç kompozitlerin kullanılmasını gündeme getirmiştir. Metal, seramik ve polimer esaslı birçok kompozit sistemi denenmiştir. Ancak seramikler çoklu atışlara uygun olmadığından avantajlarını nispeten yitirmiş sayılabilir. Öte taraftan, Polimerler de yüksek tahribatlı mühimmatı korumada avantaj sağlamamaktadır. Halen hem çoklu atışlarda hem de yüksek tahribatlı mühimmatlarda en önemli aday malzemeleri çelikler olarak göze çarpmaktadır.

Bu çalışmada, çeşitli çelik (AISI 1050, AISI 4140, AISI 4340 ve 100Cr6) ve alüminyum alaşımlarına (AA5083 ve AA7075) farklı koşullarda ısıtma işlemleri uygulanarak değişik mekanik özellikler elde edilmiş ve bütüncül malzemeler olarak denenmiştir. Bunlara ek olarak, seramiklerin ön katman olarak kullanılması durumunda balistik başarımları nasıl etkilediğini görmek amacıyla en iyi başarımları gösteren metal zırhın önünde seramik katman kullanılarak denenmiştir. Deneylerde tüm malzemeler için 5 farklı alan yoğunluğu sabit tutularak, çelikler için 4, alüminyum alaşımı 7075 (ısıtılabilir) için 3 farklı ısıtma işlemi koşulu denenmiştir. Her bir numune grubundan 5'er adet hazırlanarak tekli atışlar yapılmıştır. Delinip delinmemelerine göre balistik başarımları belirlenmiştir. Balistik deneyler sonrasında makro ve mikro incelemeler yapılarak başarımları etkileyen iç etmenler ve hasar mekanizmaları irdelenmiştir. Analitik modeller araştırılmış, deneysel sonuçlarla analitik modellerin uyumu gösterilmiştir. Yeni bir analitik yaklaşım geliştirilmiştir.



Şekil 1.1. 13.yy Türk zırhı. Döneminin en iyi korumasını sağlamıştır. Örgü şeklinde olması toplam zırh ağırlığının düşük olmasını sağlamıştır. Hiçbir kılıç darbesi ile hasar görmemiştir [1].

BÖLÜM 2

2. BALİSTİK

Balistik, mermilerin hareketleri ile ilgilenen bilim dalıdır. Aynı zamanda uygulamalı mekanik biliminin özel bir bölümü olarak da kabul edilir [3]. Merminin namludan çıkıp hedefe ulaşmaya kadar geçirdiği süreçte birçok karmaşık olay gerçekleşmektedir. Bu çeşitli olaylar toplu halde balistik olarak adlandırılmaktadır. Bu terim çok geniş ve kapsamlıdır. Bu nedenle balistik aşağıda sıralandığı gibi 3 bölüme ayrılmıştır:

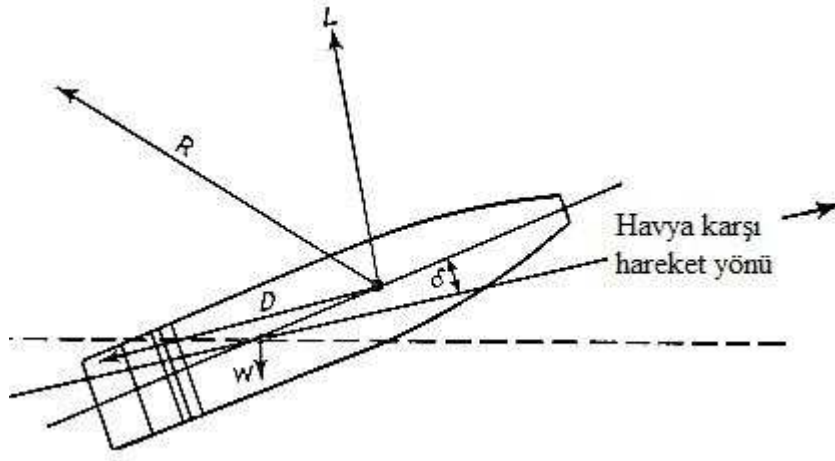
- 1) İç Balistik: Namlu içinde gerçekleşen durumları inceleyen bilim ve teknolojidir.
- 2) Dış Balistik: Merminin uçuşu sırasındaki aerodinamik kuvvetleri inceleyen bilim ve teknolojidir.
- 3) Terminal Balistik: Mermi ile hedefin çarpışma dinamiği ile ilgilenen bilim ve teknolojidir.

2.1. İç Balistik

İç balistik, barutun yanma şeklini, elde edilen basıncı, namlu boyunca merminin hızını, barut haznesinin boyutlarının hesaplanmasını kapsar. Silah için barut-basınç eğrisi elde edildikten sonra, silah üretim ilkeleri göz önünde bulundurularak her bir noktaya gelmesi beklenen basınç miktarını karşılayabilecek duvar kalınlıkları hesaplanabilir [4]. Haznedeki barutun itilerek sıkıştırılmasıyla belirlenen ortamda yanma başlar. Basınç miktarının artmasıyla yanma da belirgin şekilde artar. Bu artış mermi atış başlangıç değerine ulaşmaya kadar devam eder. Mermi atış basıncı, merminin ileri doğru hareket edebileceği basınç değeridir. Mermi namlu boyunca hareket ettikçe artan gaz miktarı için yeterli boşluk elde edilir ve böylece basınç artışında düşüş sağlanır. Boşluk artışından sağlanan basınç düşüşü yanan baruttan kaynaklanan basınç artışına eşit olduğunda basıncın en yüksek değerine ulaşılır. Daha sonra namludaki basınç giderek düşer. Bu sırada tüm barut yandıktan sonra bile ivmelenme devam eder. Fakat hemen namlu çıkışında, gecikmeden kaynaklanan, ivme artışı azalışı başlar.

2.2. Dış Balistik

Dış balistik, merminin havadaki hareketini ve uçuş sırasındaki davranımını inceleyen bir fizik dalıdır. Burada kullanılan mermi kelimesi hedefe atılan ya da fırlatılan herhangi bir rijit nesnedir. Mermi kelimesi füzeleri, silah mermilerini ve uçaktan atılan bombaların vs. tamamını kapsar [3]. Mermi havadayken Şekil 2.2.1'de gösterildiği gibi hareket yönü ile δ açısı yapan bir eksene sahiptir. Hareketine farklı kuvvetler etki eder. Bu hareket, yerçekimi w 'ye (dikeyde aşağı doğru), hıza, hava ve merminin özneliklerine, merminin hareket ettiği yöne bağlı bir hava kuvveti R 'ye bağlıdır [3]. Eğer δ , sıfıra eşitse ve mermi kendi eksenine göre simetrikse R kuvvetinin yönü mermi hareket yönünün tam tersi yöndedir.



Şekil 2.2.1. Mermi üzerine etki eden kuvvetlerin gösterilmesi [3].

Genellikle δ , sıfır olmaz bu nedenle, R hareket yönünü keser [3]. İşte dış balistik bilimi bu türlü havadinamiği kuvvetlerinin merminin uçuşu sırasındaki etkilerini inceler.

2.3. Terminal Balistik

Terminal balistik, merminin hedef üzerindeki etkisini ya da zırhın (hedefin) mermi üzerindeki etkisini inceler. Bunun yanında hedef darbe dinamiği ile de ilgilenir [3]. Darbe sırasında iki madde arasındaki ilişki yalnızca askeri sahada değil birçok alanda mevcuttur [5]. Sivil teknolojinin daha karmaşık bir hal almasıyla malzemeler üzerine uygulanan kısa süreli ani yüklemelerin malzeme özelliklerine etkisi ile ilgili çeşitli sonuçlar elde edilmiştir. Değişik sistemlerde güvenli ve en uygun tasarımların yapılabilmesi için kısa süreli ve yüksek

değerdeki yüklerin uygulanması durumunda malzeme davranımının iyi anlaşılması gerekir. Bu sistemler aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- 1) Ön gerilmeli beton yapıların denetimli yıkımlarında,
- 2) Zehirli maddelerin güvenle taşınmalarında,
- 3) Nükleer reaktörlerin zararlı etkilerinden korunmayı sağlayan basınçlı kapların iç ve dış tehlikelerden korunmasında,
- 4) Uzay araçlarının göktaşı yağmurlarından korunmasında,
- 5) Araçların çarpışma ve kaza esnasında içerideki personele zarar vermemesi için,
- 6) Polis memurlarının, yönetici ve iş adamlarının, devlet ve askeri personellerin korunması için kumaş zırhlar da dâhil olmak üzere hafif zırhların tasarımında,
- 7) Askeri araç, uzay araçlarının ve yapıların darbe ve patlama yükleri altında altındaki hasar miktarlarının belirlenmesinde,
- 8) Metallerin patlama ile şekillendirilmesi ve kaynaklanmasında.

Darbe olgusu çeşitli temel disiplinleri içine alır. Düşük hız bölgesindeki (<50m/s) durumlar yapı dinamiğinin alanına girer. Bu hızlarda bölgesel batma ve delinmeler tüm sistemin hasara uğraması olarak kabul edilir ve gönderilen enerji tüm alan tarafından karşılanır. Yükleme ve cevap zamanı genellikle milisaniye mertebesindedir. Ancak, ateş hızı 0,5–2 km/s gibi hızlara ulaştığında tüm alan değil küçük bir bölge enerjiye maruz kalır ve düşük hızların tersine tüm bölge değil birkaç mermi çapı kadarlık bir bölge bu enerjiye cevap verir.

Darbe sonrası şok dalgalarının şekli kırılma mekanizmalarının anlaşılmasında yardımcı olur. Ayrıca, hızın, geometrinin, malzemenin kimyasal bileşiminin, gerinim hızının, bölgesel kalıcı akmanın ve kırılmanın etkileri darbe sürecinin ön kabulleridir.

Genellikle yükleme ve cevap zamanı mikro saniye mertebesindedir. Darbe hızındaki ek artışlar (2–3 km/s) malzeme dayanımının birkaç kat üssü daha yüksek basınçlara neden olur. Bu durumda çarpılan katılar darbenin ilk anlarında akışkan gibi ele alınabilir. Çok yüksek hızlardaki (>12 km/s) darbe durumlarında enerji düşüsü gerçekleşir. Böyle yüksek hızlar, çarpılan malzemenin patlayıcı buharlaşması şeklinde sonuçlara neden olur [5].

BÖLÜM 3

3. ZIRH ÇEŞİTLERİ VE MALZEMELERİ

Bütüncül malzemelerin tek başlarına hem hafif hem de balistik başarımı yüksek olması oldukça zordur. Bu yüzden kompozitler bütüncül zırhlara karşı en önemli alternatif olarak karşımıza çıkmaktadır. Temel olarak iki ana başlık altında zırh malzemeleri ele alınabilir. Bunlar, bütüncül zırhlar ve kompozit zırhlardır.

3.1. Bütüncül Zırhlar

Savunma uygulamalarında uygun malzeme seçimi, güvenlikten ödün vermeden enerji tasarrufu ve yüksek hareket kabiliyeti açısından oldukça önemlidir. Bu nedenle zırh tasarımında belirli bir mühimmatın tahribatını engelleyebilecek en düşük alan yoğunluğundaki malzeme seçilmelidir. Bu bakımdan birçok malzeme ve malzeme sistemi düşünülebilir. Ancak çelik halen, üstün mekanik özellikleri sayesinde en önemli aday malzemedir. Buna ek olarak çelik çok geniş bir teknolojik veri tabanına sahiptir ve göreceli olarak ucuz sayılabilir. Fakat çelik göreceli olarak yüksek yoğunluğa sahiptir. Bu durum ise ısıl işlem yoluyla çeliğin sertliğinin artırılması ile büyük oranda giderilebilir. Çeliğin dışında, yüksek dayanımlı alüminyum alaşımları da özgül dayanımlarının yüksek olması nedeniyle zırh uygulamaları için iyi birer potansiyel sayılırlar. Bir diğer önemli aday malzeme de titanyum alaşımlarıdır ancak, maliyetleri göreceli olarak çok yüksektir. Bu durum sahip oldukları yüksek potansiyele rağmen kullanım olasılıklarını kısıtlamaktadır.

İlk yapılan çalışmalardan birinde [6], Alüminyum alaşımı (AA) 7039'un zırh delici mermiler karşısında zırh çeliğinden daha iyi başarımlar gösterdiği belirtilmektedir. Bu malzemelerin balistik başarımı eğiklikle beraber artmıştır. Öte yandan, bu çalışmaya göre, AA 7039'un kullanımı ağırlıktan kazanç açısından çelik ile karşılaştırıldığında da daha avantajlıdır. Bir başka çalışmada ise [7], Woodward, metal esaslı zırh malzemelerinin seçimi için bir ölçüt ortaya atmıştır. Bu ölçüte göre, SAE 1020, SAE 4130, P8 Hadfield çeliği, AA 5083, AA7039, titanyum, titanyum alaşımı 318 ve Ti-8Al-1Mo-1V çeliği için fiziksel ve mekanik özellikleri kullanılarak karşılaştırma yapmıştır. Buna göre, balistik başarımlar açısından titanyum alaşımları ve Hadfield çeliği diğerlerine göre daha başarılı bulunmuştur.

Manganello ve Abbot [8], çelik zırhların düşük hız darbe dayanımlarına çelik özelliklerinin etkisini incelemişlerdir. Bu çalışma, balistik başarımları en çok etkileyen özelliğin sertlik olduğunu ortaya koymuştur. Bir başka çalışmada da Gupta ve Madhu [9], tek katmanlı ve çok katmanlı olarak yumuşak çeliğin, RHA (haddelenmiş homojen zırh) çeliğinin ve alüminyum'un 800-880 m.s⁻¹ hıza sahip 6,2 mm'lik mermiler karşısındaki balistik başarımlarını incelemişlerdir. Katman kalınlığı ikiden fazla olduğunda balistik dayanımın olumsuz etkilendiği sonucuna ulaşılmıştır. Dikshit ve arkadaşları [10], 300-800 m.s⁻¹ hıza sahip mermiler karşısında zırh levhasının sertliğinin balistik başarımları etkisini incelemişlerdir.

Bir başka çalışmada ise Sorensen ve arkadaşları [11], 1,5-4 km.s⁻¹ hıza sahip iki kademeli gaz tabancası ile gönderilen mermiler karşısında soğuk haddelenmiş zırh çeliğinin yüksek hız balistik deneylerini yapmıştır. Yüksek hızlarda tahribat mekanizmasını belirlemek için bütüncül ve dağılımlı mühimmat darbesini denemişlerdir. Buna ek olarak, Lach ve arkadaşları [12], azot içeren östenitik çeliğin ve yüksek dayanımlı zırh çeliğinin 2500 m.s⁻¹ hızla gaz tabancasından gönderilen mermiler karşısında balistik başarımlarını incelemişlerdir. Yüksek dayanımlı zırh çeliği daha yüksek sertliğe sahip olmasına rağmen aynı başarımları gösterememiştir. Yine Gupta ve Madhu [13] tarafından yapılan bir başka çalışmada yumuşak çeliğin 6,2 mm'lik mermiler karşısındaki normal ve eğik darbe testleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışma sonucunda kritik sekme için eğiklik açısı arttıkça balistik sınırın da arttığı tespit edilmiştir.

Reddy ve arkadaşları [14], 7,62 mm'lik mermiler karşısında yüksek mukavemet düşük alaşım çeliklerinin birçok kaynak koşulunda balistik başarımlarını incelemişlerdir. Kabuklu metal ark kaynağı, gaz tungsten ark kaynağından ve özlü tel kaynağından da daha yüksek balistik başarımlar sergilemiştir. Anderson ve arkadaşları [15], mermi çekirdeğinin sertliğinin balistik başarımları etkisini incelemişlerdir. Mermi çekirdeğinin sertliği hedefin sertliğinden yüksek olmadıkça balistik başarımlar mermi çekirdeğinin sertliğinden bağımsız olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Edwards ve Mathewson [16], % 0,95 karbon içeren takım çeliğinin kaynaklı ve kaynaklı olmayan koşullarda 7,62 mm'lik küre ve zırh delici mermiler karşısındaki balistik başarımlarını incelemişlerdir. 510 HV sertliğin üzerinde çok büyük çatlaklar gözlemişlerdir. Son zamanlarda yapılan bir çalışmada [17], yüksek mukavemet düşük alaşım çeliğinin (50CrV4) 7,62 mm'lik zırh delici mermiler karşısındaki balistik başarımlarını katmanlı kompozitlerle karşılaştırma amaçlı olarak araştırılmıştır. Yapılan incelemelere göre hedef malzemenin

sertliği arttıka balistik başarımı artmaktadır. Buna ek olarak, alümina/alüminyum katmanlı kompozitinin zırh çeliğine oranla ağırlıkça %26 kazanç sağladığı gösterilmiştir [17, 18].

Dey ve akadaşları [19], yapı çelikleri, Weldom 460E, Weldom 700E ve Weldom 900E çeliklerinin dayanımlarının balistik başarımına etkisini 150-350m.s⁻¹ hızda mermi gönderebilen bir gaz tabancası kullanarak incelemişlerdir. Balistik sınır hızının, küt uçlu mermiler karşısında dayanım arttıka azaldığı belirlenirken konik ve yumru mermiler karşısında dayanım arttıka arttığını tesbit etmişlerdir. Bunlara ek olarak yine Dey ve ekibi [20], Weldom 700E' nin ortalamanın altındaki hızlarda bütüncül ve katmanlı halde balistik başarımını gaz tabancası ile denemişlerdir. Borvik ve arkadaşları [21], sayısal ve deneysel çalışmaları birlikte yaparak Weldom 460E'nin balistik başarımını araştırmışlardır. Daha önce yaptıkları iki çalışma ile uyumlu sonuçlar elde etmişlerdir.

Ayrıca, Maweja ve Stumpf [22,24], hasar mekanizmalarını ve hem darbe bölgesinde hem de darbe bölgesine dik kesitte meydana gelen faz dönüşümlerini incelemek için çeşitli koşullardaki zırh çeliklerini 5,56 mm'lik zırh delici mermilerle balistik olarak incelemişlerdir. Zırh malzemesinin içyapısının balistik başarımı doğrudan etkilediğini belirlemişlerdir.

3.2. Kompozit Zırhlar

Kompozitlerin zırh olarak kullanılması için hem yoğunluklarının düşük hem de balistik balistik başarımları yüksek olmalıdır. Buna bağlı olarak kompozit zırhlar üzerine iki sistem üzerinde yoğunlaşılmıştır. Bunlar plastik esaslı kompozit zırhlar ve seramik esaslı katmanlı kompozit zırhlardır. İki ana başlık altında plastik ve katmanlı kompozit zırhlar ele alınabilir.

3.2.1. Plastik Esaslı Kompozit Zırhlar

Plastikler çok düşük yoğunluklu malzemelerdir. İşlenebilirlikleri yüksek ve düşük maliyetlidir. Ayrıca, bulunması kolay malzemelerdir. Bu avantajlarından faydalanarak plastikler çeşitli zırh uygulamalarında kullanılmıştır. Plastikler çok katlı olarak [25, 26, 27], destek katman olarak [28] ve kumaş şeklinde [29, 30, 31] çeşitli çalışmalarda denenmiştir. Plastik esaslı ya da plastiklerin özelliklerinden faydalanılarak üretilen zırhların başarımını etkileyen bazı etmenler vardır.

3.2.1.1. Plastik Esaslı Kompozit Zırhlarda Başarımı Etkileyen Faktörler

Başarımı etkileyen faktörler aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Mermi geometrisi ve hızının etkisi
- Darbe sönümlene kabiliyeti
- Kumaş zırhlar için parçacık mukavemetlendirmesi
- Katmanlar arasındaki yapıştırma yüzeyinin etkisi
- Eğiklik etkisi
- Çevre şartlarının etkisi
- Katman sayısının etkisi
- Dokuma kumaşlarda örgü şeklinin etkisi
- Basınç aktarımı

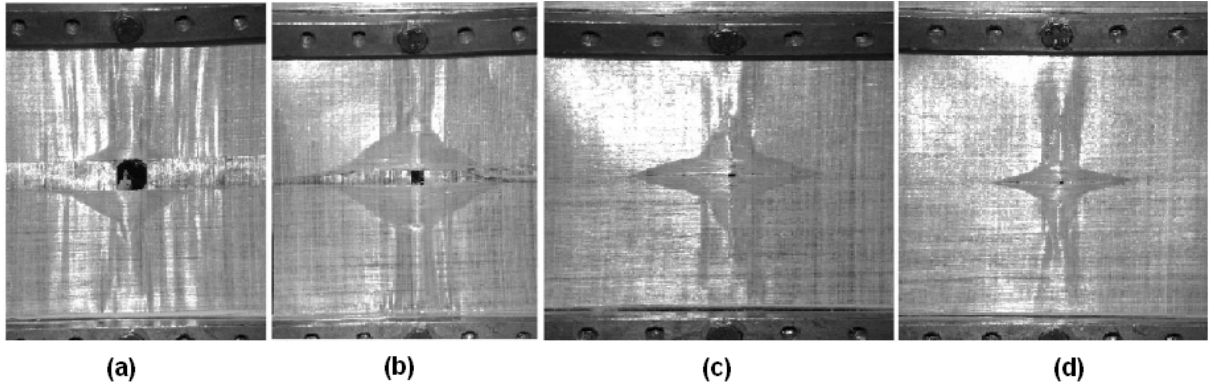
3.2.1.1.1. Mermi geometrisi ve hızının etkisi

Mermi geometrisi zırhta meydana gelecek hasarı önemli ölçüde etkiler. Tan [25] çalışmasında 4 farklı geometrideki mermilerle esnek levhaların mermideki kinetik enerjiyi sönümlene kabiliyetini ve oluşan hasar mekanizmalarını incelemiştir. Çalışmada Spectra® levhaları kullanılmıştır. Levha termoplastik içine gömülmüş polietilen filamentli zincirleridir. Mermi geometrileri Şekil 3.2.1’de gösterildiği gibi seçilmiş ve çeşitli hızlarda balistik testler yapılmıştır.



Şekil 3.2.1. Kullanılan mermi geometrileri. Soldan sağa doğru sivri kemerli, yarı küresel, konik ve silindirik mermi geometrileri [25].

Deneyler sonucunda Şekil 3.2.2’de görüldüğü gibi silindirik mermiler düzgün bir daire şeklinde levhayı kesmiştir. Yarı küresel mermiler elyafları gerdirerek köşeli yırtıklara neden olmuştur. Sivri kemerli ve konik mermiler ise en küçük delik oluşturarak kumaşı yırtmıştır. Deliğin küçük olması merminin kinetik enerjisinin çok küçük bir bölümünü yırtmak için harcadığı anlamına gelir.



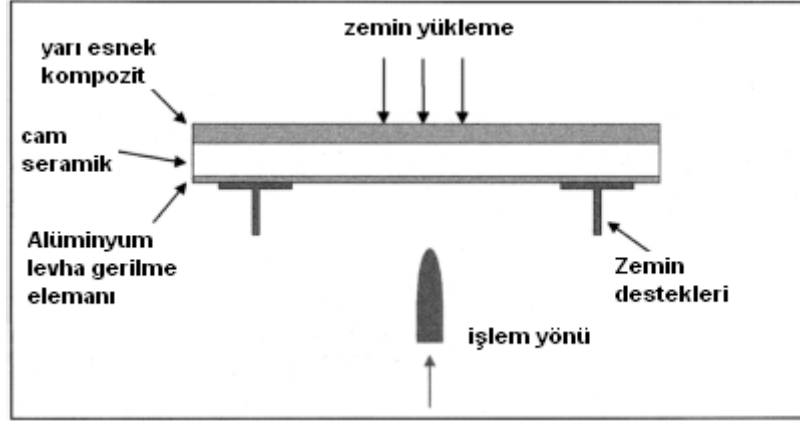
Şekil 3.2.2. Farklı geometrilerdeki mermilerin hasır örgü karbon elyaf takviyeli bir kumaşı nasıl deldiğinin gösterimi [25].

Konik ve sivri kemerli mermileri durdurmak çok daha zordur. Ayrıca bu çalışmada yüksek mermi hızlarında balistik darbenin etkilediği bölgenin daha büyük olduğu görülmüştür. Bu sonuç esnek levha kullanımının balistik darbe karşısında sönümlenme kabiliyetinin daha iyi olduğu anlamına gelir.

3.2.1.1.2. Darbe sönümlenme kabiliyeti

Zırhın darbe sönümlenme kabiliyeti yüksek olmalıdır. Balistik darbe sırasında çok kısa bir zaman diliminde darbe gerçekleştiğinden hem merminin çarptığı yüzey sert olmalıdır hem de çarpılan yüzey merminin kinetik enerjisini soğurmalıdır [31, 32]. DeLuca [28], yaptığı çalışmada plastiklerin darbe sönümlenme kabiliyetinden ve seramiklerin sertliklerinden faydalanmıştır. Plastik takviyenin darbe sönümlenmeyi önemli ölçüde artırdığını gözlemlemiştir. Horsfall [33], hava araçlarının balistik korumasında darbe sönümlenmenin önemli olduğunu bunun için yapısal bir zırhın kullanılabileceğini göstermiştir. Şekil 3.2.3’de yapısal bir zırhın şematik gösterimi vardır.

Plastik katman darbenin sönümlenmesinde önemli rol oynar [33]. Wang çalışmasında katmanlı polimer kompozitlerin 7,62 mm 'lik zırh delici mermiler karşısındaki davranımını incelemiştir. Ayrıca aynı malzemeleri çok düşük bir hızda tekrar test etmiştir. Mermi biçimindeki bir batıcı uç ile yaptığı testlerde cam elyaf takviyeli polimer levhalar farklı hasar mekanizmaları göstermelerine rağmen enerji soğurma miktarları hemen hemen aynı olmuştur.



Şekil 3.2.3. Yapısal zırhın şematik gösterimi [33]. En üstte yarı esnek kompozitten zemin yükleme katmanı, ortada cam seramik ve mermiyle ilk temasın olduğu alt katmanda alüminyum levha gösterilmiştir.

Mermi ilk olarak alüminyum ile karşılaşır. Hızla alüminyumu deldikten sonra cam seramiğin sertliğinden faydalanarak merminin kinetik enerjisi soğurulur. Yarı esnek kompozit bölge de sistemin tok davranmasını sağlar.

Yapılan testler sonucunda tüm numuneler delinmiştir. Destek katman olarak yarı esnek kompozitin seramiklerin arkasında kullanılabileceği ifade etmiştir [34]. Hetherington [36], 12,7 mm'lik mermilerle önde alümina seramik katman arkada polimer destekli zırhı denemiştir. Polimer destek katmanının balistik başarımı artırdığını gözlemlemiştir.

3.2.1.1.3. Kumaş zırhlar için parçacık mukavemetlendirmesi

Zırh sistemlerinde mermi ile hedef arasındaki sürtünme ve sürtünme yüzeyi başarımı önemli ölçüde etkiler. Konu ile ilgili yapılan çalışmalarda mermi ile hedef arasındaki sürtünmeden kaynaklanan enerji kaybının başarıma etkisi incelenmiştir. Metal esaslı kompozitler için parçacıkların mermi çekirdeğinin kırılmasına kadar etkili olduğu gözlemlenmiştir [36]. Tan

[29], çalışmasında silika asıltı parçacıkları ile kumaşın dayanımını artırmayı başarmıştır. Silika parçacıkları mermi yüzeyinde sürtünmeye neden olmuş ve mermiyi aşındırmıştır. Mermi aşınması için gerekli enerji merminin kinetik enerjisinde kayba neden olmuş ve balistik başarımı iyi yönde etkilemiştir.

3.2.1.1.4. Katmanlar arasındaki yapıştırma yüzeyinin etkisi

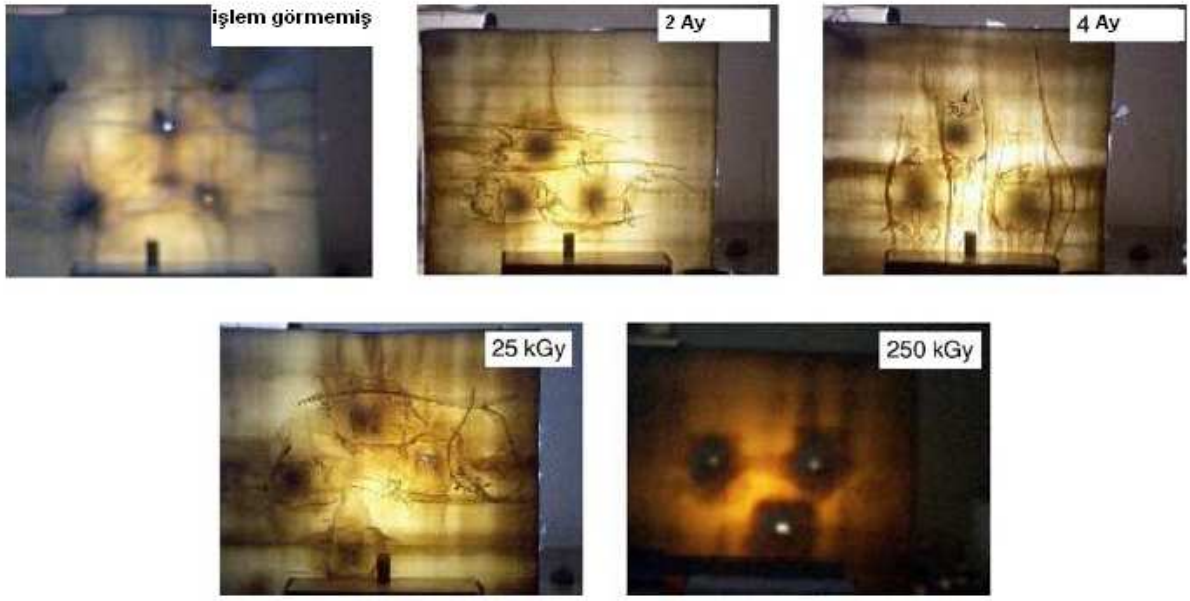
Özellikle metal/seramik sistemler için yapışma yüzeyinin etkisi çok çalışılmış bir konudur [37]. Bununla beraber Cork [40], çalışmasında dar kumaşları kevlar ile takviye ederek plastik katmanlı kompozit zırh elde etmiş ve yapışma yüzeyindeki iyileştirmenin ve yapıştırıcı kalınlığının az olmasının balistik başarımı önemli ölçüde iyi yönde etkilediğini gözlemlemiştir.

3.2.1.1.5. Eğiklik etkisi

Rijit bir zırh delici mermi eğimli bir yüzeye çarptığında asimetrik kuvvetlere maruz kalır [38]. Birçok seramik/metal sistemi için bu durum çalışılmış [39,40] ve yeteri kadar küçük açılarda iyi desteklenmiş kompozitlerin mermiyi sektirdiği görülmüştür [38]. Rosenberg [38], çalışmasında eğimli polimer levhaların 7,62 mm'lik zırh delici mermiler karşısındaki sekme davranışını incelemiştir. Bu çalışmanın sonuçlarına göre gevrek malzemelerin merminin sekmesine izin vermeden kırıldığı söylenebilir.

3.2.1.1.6. Çevre şartlarının etkisi

Polimer esaslı zırhlar da diğer tüm zırhlar gibi çevre şartlarında kullanılmaktadır. Bu nedenle polimer esaslı zırhların çevre şartlarından nasıl etkilendiği önemli bir konudur. Alves [41], çalışmasında şartlandırmanın ve gama ışınının etkisini incelemiştir. Fizikokimyasal etmenler ciddi anlamda polimerin zincir yapısında, mekanik ve balistik özelliklerde değişikliklere neden olmaktadır. Özellikle gama ışınına maruz kalan numunelerde ciddi hasarlar gözlemlenmiştir. Şekil 3.2.4'de çeşitli sürelerde şartlandırılmış ve gama ışınına maruz bırakılmış numunelerin test sonrası görüntüleri verilmiştir.



Şekil 3.2.4. Çeşitli süre ve etkilerde şartlandırılmış ve gama ışınına maruz bırakılmış numunelerin test sonrası görüntüleri [41].

Şekil 3.2.4'deki ilk resim hiç bir işlem görmemiş numunenin durumudur. Takip eden iki resim ise sırasıyla 2 ay ve 4 ay şartlandırılmış numuneler ve alt sıradaki iki resimde de çeşitli yüklerdeki gama ışını altında bırakılmış numuneler gösterilmiştir. Görüldüğü gibi özellikle gama ışınları numunenin başarımını çok önemli ölçüde etkilemiştir.

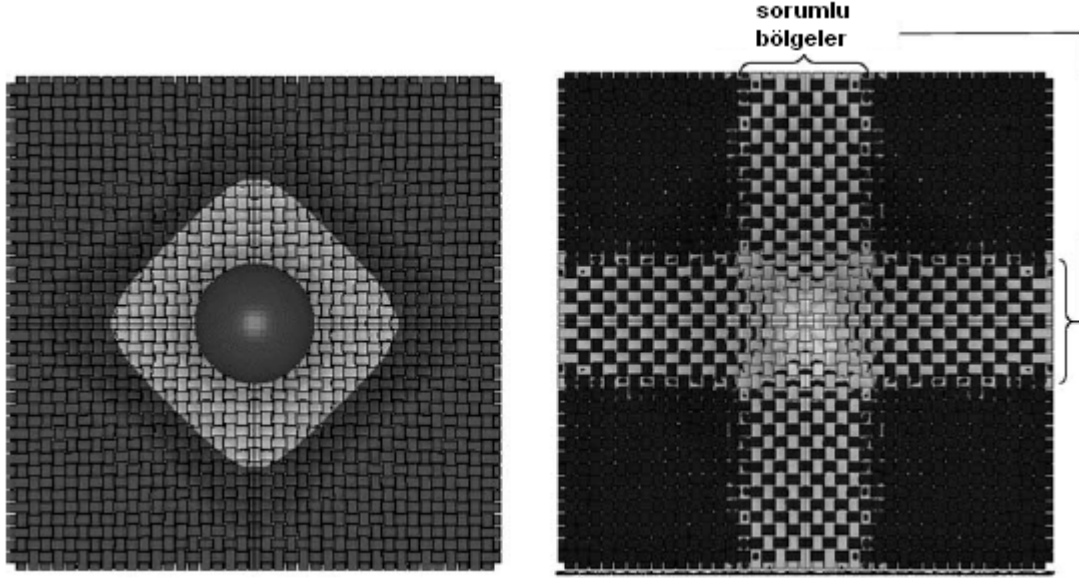
3.2.1.1.7. Katman sayısının etkisi

Katman sayısındaki artış balistik başarımı doğrudan etkiler. Fındık [26, 27], çalışmalarında çeşitli silah ve mermilerle katmanlı polimer kompozit zırhları denemiştir. Termoset reçine numuneler elle yatırma yöntemi ile üretilmiştir. 18 ve 22 katlı kompozitler delinirken 28 ve 36 katlı kompozitlerin delinmediğini göstermiştir.

3.2.1.1.8. Dokuma kumaşlarda örgü şeklinin etkisi

Kumaşların kendi başlarına balistik koruma sağlamaları mümkün değildir. Kumaşlar elyaflar ile takviye edilerek balistik koruma sağlanabilir. Kumaşlar, elyafların örgülü bir yapı içinde

bulunmalarına ya da farklı yön ve doğrultularda dizilmelerine izin verir. Örgü şekline göre dizilim değişmesiyle, iplerin birbirleri ile olan sürtünmesi, esnekliği ve elyafların mukavemetinden faydalanılır [31]. Şekil 3.2.5’de hasır örgü kumaşların darbe sırasındaki davranışı gösterilmiştir.



Şekil 3.2.5. Hasır örgü durumunda kumaşın nasıl davrandığının sayısal modelde gösterimi [31].

Bazı örgü şekillerinde ip çekilmesi oluşur, bazılarında ip hemen kopar [29]. Dar kumaş türlerinde kare (hasır) dokumanın düz örgüden daha iyi olmadığı görülmüştür [30]. Ayrıca iki taraflı yerleştirilen dar kumaşlar geniş kumaşlara göre daha yüksek başarımlı göstermiştir. Cork [30], çalışmasında elyaf takviyesinin kumaş örgü şekli ne olursa olsun başarımlı artırdığını göstermiştir.

3.2.1.1.9. Basınç aktarımı

Kumaş zırh sistemlerinde önemli etmenlerden biri de basıncın iletilmesidir. Zırhın delinmemesi kadar çarpma sırasındaki darbe dalgalarının sönümlenmesi de önemlidir. Roberts [62], yaptığı çalışmada bir insan gövdesi modeli üzerine duyargalar yerleştirerek deneylerde delinmeyen ince kumaş bir zırh ile korumuştur. Atışlar boyunca insan gövdesi modeline aktarılan basınç değerlerini kaydetmiştir. Deneyler sonucunda zırh delinmese de

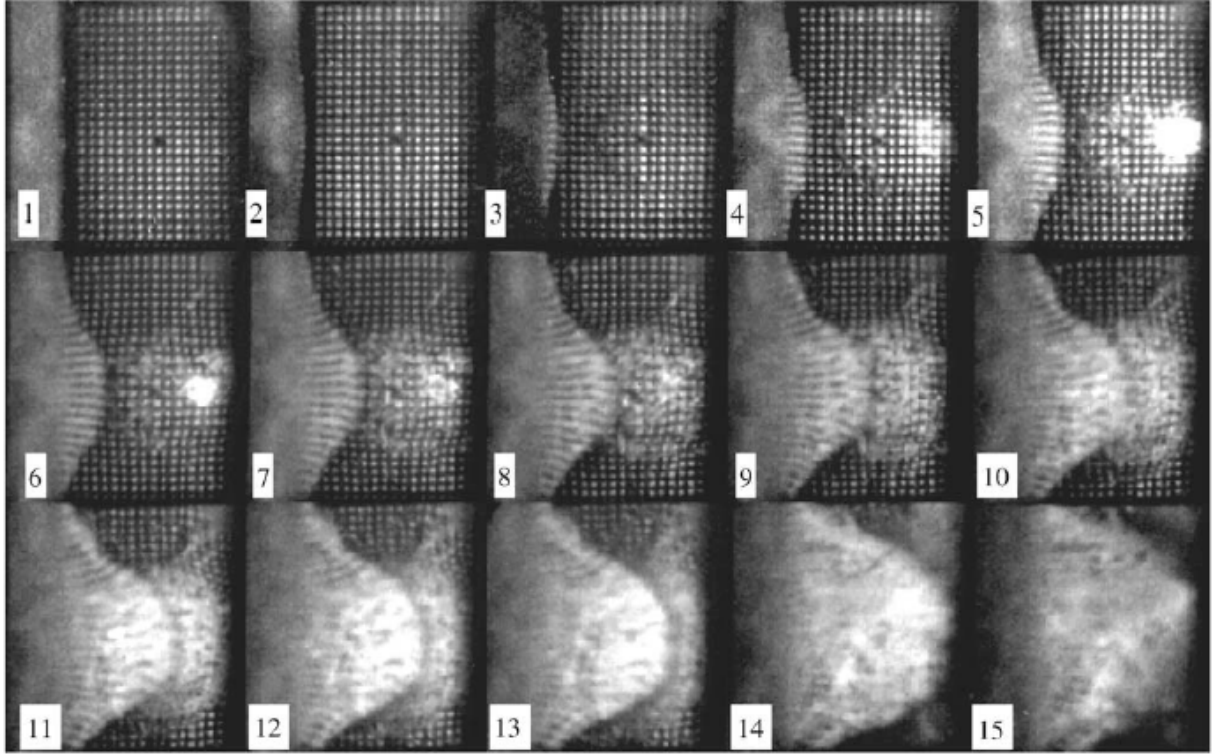
zırhtan modele aktarılan basınç miktarı modelin kalbinin sıkışmasına, ritminin bozulmasına ve işlevini yerine getiremez duruma gelmesine neden olmuştur. Bunu göz önünde bulundurarak seçilen malzemenin darbe sırasındaki basıncı sönümleyebilmesi gerekir.

3.2.2. Seramik Esaslı Katmanlı Zırhlar

Metal zırhlar zırh sistemlerinde çokça kullanılmasına rağmen yüksek yoğunlukları hafif zırh uygulamalarında kullanım olanaklarını kısıtlamaktadır. Polimer malzemeler yoğunluk yönünden çok avantajlı olsalar da akma dayanımları çok düşük olduğundan zırh delici mermiler karşısında kullanılmaları çok zordur. Bu durum göz önünde bulundurulduğunda sertlikleri çok yüksek yoğunlukları göreceli olarak düşük olan seramikler önemli aday zırh malzemeleridir. Seramikler kırılğan olduklarından tok bir malzeme ile desteklenmelidir. Seramik levhalar metal esaslı ya da yüksek tokluklu polimer esaslı malzemelerle desteklenirler. Seramik metal katmanlı kompozitleri ağırlıktan çok önemli ölçüde avantaj sağlar [40, 42, 43].

3.2.2.1. Hasar Mekanizmaları

Wilkins [44]'e göre zırh delici 7,62 mm'lik mermiler seramik/metal kompozite çarptığında konik bir şekilde delik açarak sistemi hasara uğratar. Bu mekanizma sonraki yıllarda başka araştırmacılar tarafından da gözlemlenmiştir [40, 43]. Bourne [32], seramik ile merminin çarpışması sırasındaki mekanizmayı belirleyebilmek için soda-kireç camı ön katmanında yüksek hızda kamera ile görüntüler almıştır. Şekil 3.2.6'da soda-kireç camı için ilk birkaç mikro saniyedeki çatlak oluşum ve ilerlemesinin görüntüleri verilmiştir.



Şekil 3.2.6. Soda-kireç camı ile merminin çarpıştığı andan itibaren ilk birkaç mikro saniye içindeki hasar mekanizmasının gösterimi. Şekilde ilk 12 görüntü 5 μ s de bir son 3 görüntü ise 15 μ s de bir alınmıştır. Malzemenin darbeye olan tepkisinin konik şekilde olduğu görülmektedir [32].

Forquin [42], benzer şekilde kırılma mekanizmalarını açıklamaya çalışmıştır. Bu çalışmaların sonuçları aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Radyal çekme ve çatlak oluşumu
- Seramik katmanda konik yapı oluşumu
- Konik yapının parçalanması ve toz haline gelmesi
- Destek katmanın delinmesi [43]

3.2.2.2. Seramik Esaslı Zırh Tasarımı

Balistik zırh üretiminde önemli başarımları için bazı önemli parametreler vardır. Bunlar; seramik malzeme seçimi, destek katman seçimi, Bağ ve empedans etkileri, uygun seramik/arka katman kalınlık oranı ve eğiklik etkisi olarak sıralanabilir. Zırh sistemlerinin

modellenmesinde Woodward [45], basit ve tek boyutlu modeli geliştirerek modelleme yönteminin gelişmesinde kolay katman kalınlıkları belirlemede oldukça önemli bir çalışma yapmıştır.

3.2.2.2.1. Seramik Malzeme Seçimi

Önde seramik katman arkada tokluğu yüksek ve dayanımı iyi olan bir malzeme kullanılan sistemlerde seramik malzemenin özellikleri başarıyı önemli ölçüde etkiler. Seramik katmanın başarıyı etkileyen özellikleri, tane boyutu, saflık, tokluk, ısıl etkiler ve kullanılan seramik türleri olarak sıralanabilir. Al-Qureshi [46], tane boyutunun balistik başarıya etkisini incelemiştir ve küçük taneli seramiklerin başarılarının büyük taneli yapıya göre daha yüksek olduğunu göstermiştir. Woodward [45], balistik başarımda tokluğun çok önemli olduğunu deneysel ve sayısal olarak göstermiştir. Sayısal yöntemlerde birçok etmenin ihmal edilebileceğini ispatlamıştır. Ortalama model tanımı ile modelini sayısal modellerin birleşimi olarak kullanmıştır. Petterson [42], kıvılcım plazma yöntemi ile pişirilmiş TiB_2 seramiklerini çelik levhalar üzerine yapıştırarak denemiştir. Ulaştığı sonuç, bu yöntem ile üretilen tam yoğunluklu parçaların balistik başarımlarının daha yüksek olduğudur. Ancak elektriksel iletkenliği olmayan tozlar için spark plazma yöntemi uygulanamaz. Raugh [48], beş farklı seramik malzemeyi ve pireksi ön katman olarak kalın çelik levhaların önünde balistik zırh olarak denemiştir. En küçük alan yoğunluğuna sahip arka katmanı delinmeyen zırhı bulmaya çalışmıştır. Alüminyum nitridin hızdan en az etkilendiğini göstermiştir. Deneyler sonucunda, TiB_2 , bor karbür ve SiC eş başarımlarını göstermiştir. Son yıllarda yapılmış bir çalışmada [49], metal destek katmanlı %95 ve %99,5 saflıklardaki alümina seramikleri sert çekirdekli 12,7 mm'lik zırh delici mermilerle 500 ila 830 m/s hızlarında denenmiştir. Yüksek saflıktaki alümina seramiği göreceli olarak düşük saflıktakine göre daha iyi başarımlarını sergilemiştir. Balistik verimin seramik kalınlığına ve mermi hızına doğrudan bağlı olduğu görülmüştür. Boccaccini [61], tokluğu artırmak için mulit anayapı içine mullit elyaf takviye ederek denemiştir. Elyaf çekmesinden kaynaklanan tokluk artışının balistik başarımlarını artırdığını gözlemiştir. Horsfall [60], yumuşak çekirdekli zırh delici mermiler karşısında lityum-çinko-silikat cam seramiğinin aynı alan yoğunluğuna sahip alümina ile eş başarımlarını gösterdiğini deneysel olarak doğrulamıştır. Bu sonuç yumuşak çekirdekli mermiler için sertlik

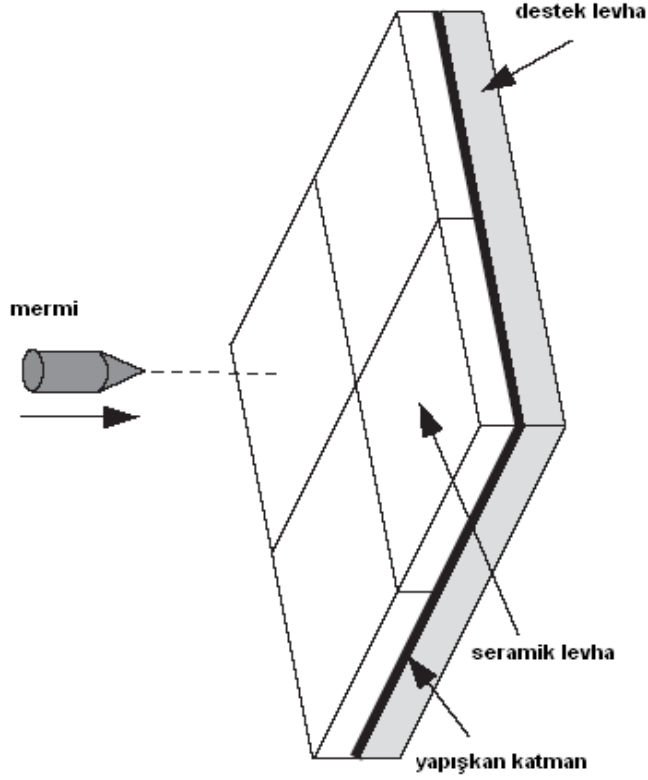
değerinin düşük olmasının çok önemli olmadığını gösterir. Çünkü lityum-çinko-silikat camı 600 HV sertlik değerine sahipken alümina 1300–1500 HV sertliğe sahiptir.

3.2.2.2.2. Destek Katman Seçimi

Seramikler çok düşük kırılma tokluğu değerlerine sahip olduklarından daima bir destek katmana ihtiyaç duyarlar. Destek katmanın yüksek tokluk ve akma dayanımı özelliklerine sahip olması istenir. Sadanandan [40], çalışmasında önde alümina arkada soğuk haddelenmiş AA5083 ve Grade 43A çeliğini 7,62 mm'lik zırh delici mermilerle denemiştir. Alümina/alüminyum sisteminin çelikli sistemle eş başarımları gösterdiğini ancak alüminyum alaşımının düşük yoğunluğundan dolayı daha avantajlı olduğunu belirtmiştir. Nair [51], alümina parçacık takviyeli arka katman malzemesinin merminin kinetik enerjisini azalttığını ve başarımları artırdığını göstermiştir. Karamış [36, 52], çeşitli alüminyum alaşımlarını SiC ile takviye etmiş ve balistik davranışlarını incelemiştir. Mermi yüzeyi ile matrikse gömülü SiC parçacıkları arasındaki yüzey deformasyonu ve aşınma balistik başarımları artırmıştır. Petterson [47], arka katman olarak titanyumu denemiştir. Önde yüksek sertlikte bir seramik kullanıldığında titanyumun gerekli tokluğu sağladığını gözlemiştir. Son yıllarda yapılan bir çalışmada [53], destek katman olarak alüminyum köpük kullanılmıştır. Yüksek tokluk avantajından dolayı alüminyum köpük kullanımı önemli bir gelişmedir. Alüminyum köpüğün gerilme dalgalarını azalttığı veya geciktirdiği gözlemlenmiştir. Çalışmada aynı alan yoğunluğuna sahip köpük halde olmayan alüminyum da kullanılmıştır. Köpüğün başarımlarının göreceli olarak daha iyi olduğu görülmüştür.

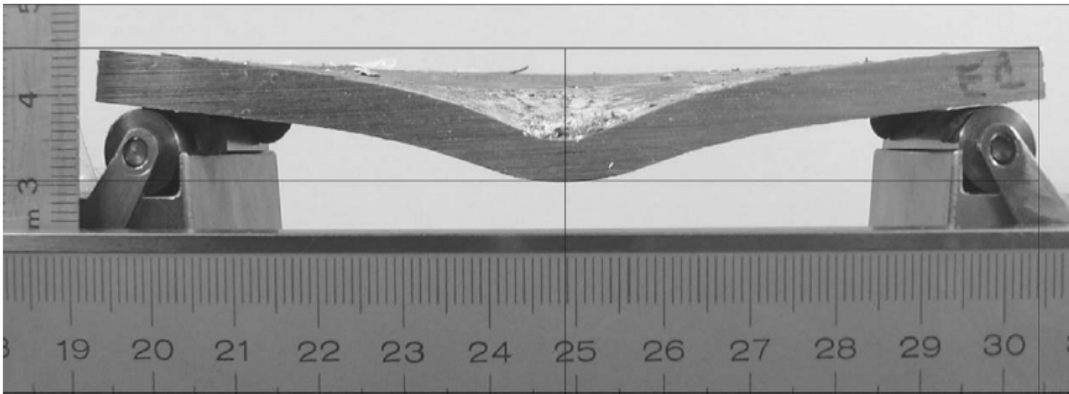
3.2.2.2.3. Bağ ve Empedans Etkileri

Metal/seramik zırh sistemlerinde metal ile seramik arasındaki bağlama çeşitli yapıştırıcı türleri ile sağlanır. Epoksi, fenolik ve poliüretan yapıştırıcılar bu amaçla sıkça kullanılır [2]. Navarro [37], çalışmasında çeşitli kalınlıklardaki epoksi reçine yapıştırıcı ile yapıştırılmış alümina/alüminyum kompozitini denemiştir.



Şekil 3.2.7. Katmanlı kompozitin ve yapıştırma yüzeyinin temsili gösterimi [37].

Şekil 3.2.7’de görüldüğü gibi mermi ile ilk karşılaşan yüzey seramik levhalardır. Seramik levhalar ile destek levha arasında yapıştırıcı katman vardır. Merminin kinetik enerjisi seramik üzerinden yapıştırıcı aracılığı ile destek katmana aktarılır.



Şekil 3.2.8. Deney sonrası arka destek katmanın kesiti [37].

Merminin uç kısmının çarptığı bölgede en büyük deformasyon gözlenir. Levha delinmemiş anca çok ciddi şekilde şekil değiştirmiştir. Şok dalgaları malzemenin yaklaşık olarak 1 cm uzamasını sağlamıştır.

Yapıştırıcı kalınlığı arttıkça arka destek katmandaki deformasyon miktarının arttığı gözlemlenmiştir. Şekil 3.2.8’de deney sonrası arka katmanın kesit resmi görülmektedir. Sun [54], alümina/alüminyum sisteminde yapıştırıcı polimeri oda sıcaklığında ve yüksek sıcaklıkta kürlenmiş ve termal etkinin balistik başarıma etkisini incelemiştir. Isıl etkilerin balistik başarıma çok az etkilediğini gözlemlemiş ve soğurulan enerji miktarının destek katmana bağlı olduğunu göstermiştir.

3.2.2.2.4. Uygun Seramik/Arka Katman Kalınlık Oranı

Florence [55], tarafından seramik kalınlığı ile arka katman kalınlığı arasında bir bağıntı çıkarılmıştır. Hetherington [56], bu bağıntıyı sadeleştirmiş ve tasarımda kolaylık sağlamıştır. Florence modeli üzerinde birçok araştırmacı çalışmış ve sayısal olarak da doğrulamaya çalışmıştır [56–60]. Wang [57], Hetherington’un yaklaşımını devam ettirmiş ve kalınlıkların oranının (seramik kalınlığı/arka plaka kalınlığı) 2–2,5 olması durumunda zırhın balistik limiti artırdığı gözlemlenmiştir. Lee [58]’ye göre de en uygun oran 1,5 ile 3 arasındadır. Elperin [60], Florence modelinin en uygun model olduğunu savunur. Ayrıca Elperin’e göre başarıma en çok etkileyen faktör alan yoğunluğudur. Fawaz [59], yaptığı sayısal çalışmada yeni bir hibrid model inşa etmiştir. Fawaz’a göre kıstas olarak ister alan yoğunluğu başlangıç noktası kabul edilsin ister hız sınırı başlangıç noktası kabul edilsin toplam kalınlık değişmemektedir.

3.2.2.2.5. Eğiklik Etkisi

Mermini hedefe belirli bir açıyla çarptığı durumlarda balistik başarıma çarpma açısından oldukça etkilenir. Hohler [39], AA7xxx serisi arka katmanla desteklenen SiC seramik katmanlı kompoziti olan sistemde başarımanın en yüksek olduğu açının 60° olduğunu deneylerinde göstermiştir. Ayrıca bu çalışmada SiC, Al₂O₃’e göre daha iyi başarıma göstermiştir. Hetherington ve Sadanandan’a [40] göre de eğim arttıkça başarıma artmaktadır. Yaptıkları deneylerde balistik sınır hızı eğimle birlikte artmaktadır.

BÖLÜM 4

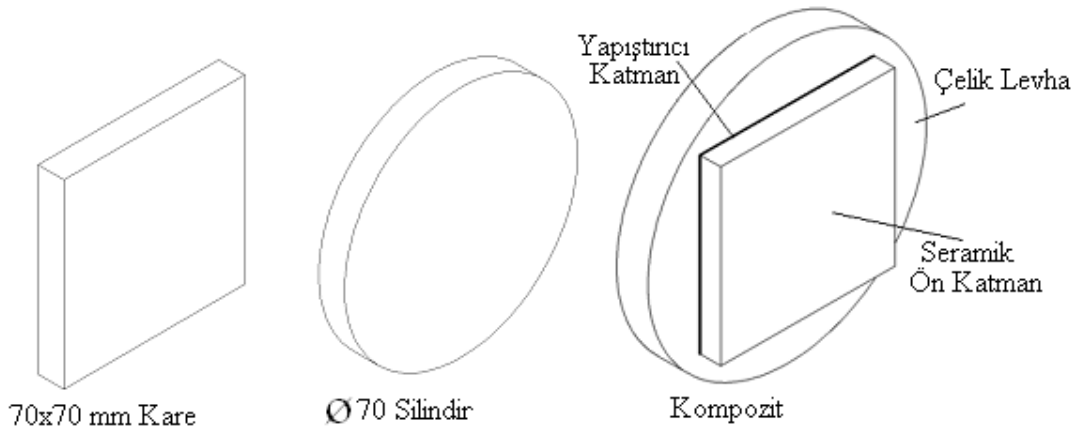
4. DENEYSEL YÖNTEM

4.1. Numunelerin Hazırlanması

Bu çalışmada kullanılan malzemeler piyasadan temin edilerek gerekli ısı işlemler yapılmak suretiyle deneye hazır hale getirilmiştir. Bu kapsamda, altı farklı malzeme; AISI 1050, AISI 4340, AISI 4140, DIN 100Cr6, AA 5083 ve AA 7075 hazırlanmıştır. Tüm numuneler için 5 farklı alan yoğunluğu seçilmiş ve her bir alan yoğunluğuna karşılık gelen kalınlıklar hesaplanmıştır. Buna uygun olarak, numuneler istenilen kalınlıklara yakın kalınlıklarda şerit testerede kesilmiş ve torna ya da freze ile tam boyuta hassas şekilde işlenmiştir. Numunelerin kalınlıkları, karşılık gelen alan yoğunluklarından bulunurken, silindir numuneler için boyutlar çap 70 mm, kare numuneler için ise 70x70 mm olarak seçilmiştir. Bu numunelerin çizgesel gösterimi Şekil 4.1’de verilmiştir. Alan yoğunluğu bağıntısı aşağıdaki gibidir:

$$\text{Alan yoğunluğu (kg/m}^2\text{)} = \sum_{i=1}^n t_i \cdot d_i \quad (1)$$

Bu ifadede, t (m) ve d (kg/m³) sırasıyla kalınlığı ve yoğunluğu belirtirken i, katmanlı yapılar için herbir katmanı ifade etmektedir. Bu çalışmada 5 farklı alan yoğunluğu 55, 70, 85, 100 ve 115 kg/m² olarak seçilmiş ve denenecek tüm malzemeler için uygulanmıştır. Çizelge 4.1’de bu numunelere ait ve seçilen alan yoğunluklarına karşılık gelen kalınlıklar gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Hazırlanan numune geometrilerinin çizgesel gösterimi.

Numuneler belirlenen kalınlıklarda işlenmiş ve ısı işleme hazır hale getirilmiştir. Kompozit sistemi için arka katman kalınlığı belirlenmiş hem seramik ön katman hem de çelik levha

toluen ile temizlenerek yapışma yüzeyleri hazırlanmıştır. Çelik levha üzerine ve seramik ön katman üzerine Sikaflex SF250 yapıştırıcı sürülmüş ve yapıştırıcı sürülü yüzeyler birbiri üzerine tutturulmuştur. Tam yapışmanın sağlanması için 25 MPa basınç altında 12 saat tutulmuştur.

Çizelge 4.1. Alan yoğunluklarına karşılık gelen kalınlıklar.

Numune Grubu	Alan Yoğunluğu (kg/m ²)					
	55	70	85	100	115	
0A						
1A						
1B						
1C						
1D						
2A						
2B	Kalınlık (mm)	7,2	9	10,8	12,7	14,4
2C						
2D						
3A						
3B						
3C						
3D						
4A						
4B		4	5.8	7,6	9,5	11,2
4C	Kalınlık (mm)	+6	+6	+6	+6	+6
4D		(seramik)	(seramik)	(seramik)	(seramik)	(seramik)
5A						
6A						
6B	Kalınlık (mm)	20	25	30	35	40
6C						

Seramik ön katman boyutları 50x50x6 mm şeklinde olan, %99 saflıktaki Al₂O₃ (Alümina) olarak belirlenmiştir. Arka katman malzemesi ise çelik ve alüminyum numunelerden en

yüksek balistik başarımı sergileyen zırh olarak seçilmiştir. Kompozit sistemde kullanılan çelik malzemenin ısıtma işlemi yapılandırma işleminden önce gerçekleştirilmiştir.

4.2. Numunelerin Isıl İşlemlerinin Yapılması

Çelik numunelerden AISI 4140, AISI 4340 ve DIN 100Cr6 için farklı mekanik özellikler elde etmek amacıyla 4 farklı ısıtma işlemi koşulu belirlenmiştir. AISI 1050 ve AA 5083 piyasadan temin edildiği gibi doğrudan kullanılmıştır. AA 7075 için ise yine farklı mekanik özellikler elde etmek amacıyla 2 farklı ısıtma işlemi koşulunda piyasadan temin edilmiş ve üçüncü koşul olarak tavlama işlemi yapılmıştır. Çizelge 4.2’de metal malzemeler için ısıtma işlemi koşulları belirtilmiştir.

Çizelge 4.2. Tüm malzeme grupları için uygulanan ısıtma işlemi değerleri.

Malzeme	Sertlik (HRC)	Östenitleme Sıcaklığı (°C)	Östenitleme Süresi (Dakika)	Menevişleme Sıcaklığı (°C)	Menevişleme Süresi (Dakika)
4140	40	860	90	580	120
	50			450	
	55			400	
	60			250	
4340	40	860	90	580	120
	50			450	
	55			400	
	60			250	
100Cr6	40	880	90	550	120
	50			400	
	55			350	
	60			200	
	Sertlik(HB)	Tavlama Sıcaklığı (°C)		Tavlama Süresi (Dk)	
AA7075	60	420		180	

AISI 4140 ve AISI 4340 öncelikle östenitleme sıcaklıkları olan 860°C ‘de östenitlenmiş, ardından tam martenzit içyapı elde etmek için su verilmiştir. Son olarak farklı sıcaklıklarda menevişlenmiş ve böylece menevişlenmiş martenzit elde edilerek farklı sertlik derecelerine ulaşılmaya çalışılmıştır. DIN 100Cr6 için ise benzer işlemler 880 °C ‘de östenitlenerek tekrarlanmıştır. AA7075 üçüncü ısıtma işlemi koşulu olarak 420 °C’de tavlama işlemi yapılmıştır.

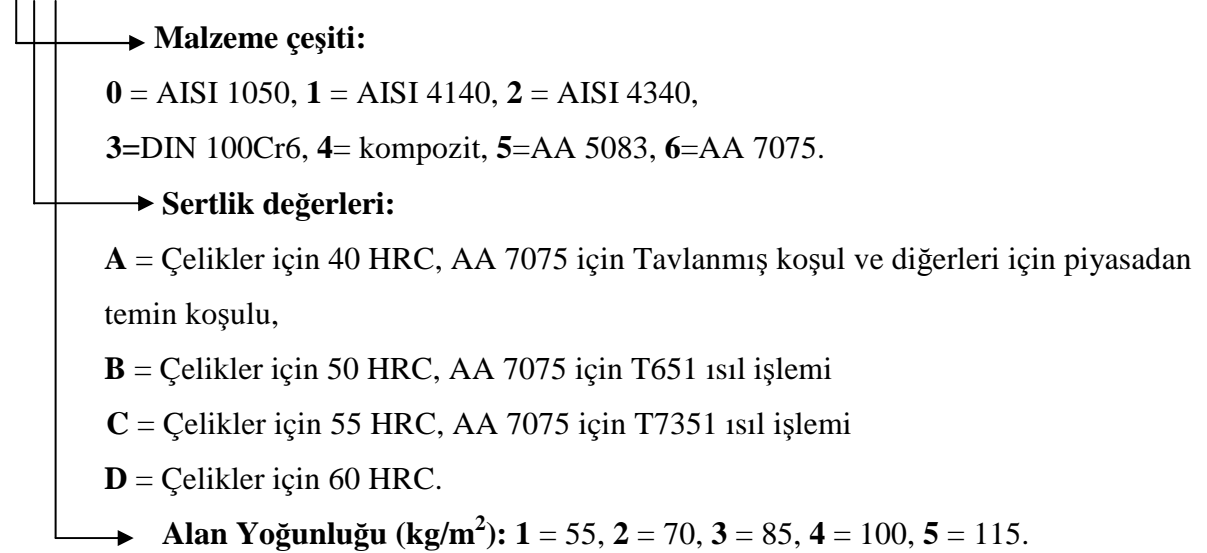
4.3. Numunelerin Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi

Hazırlanan koşullardaki tüm numunler için mekanik özelliklerini belirlemek üzere çekme deneyi, çentik-darbe deneyi, sertlik ölçümleri ASTM'nin ilgili standartlarına uygun olarak yapılmıştır [63, 64, 65].

Atışı gerçekleştirilecek her bir numune için sertlik değerleri 3 kez ölçülmüş ve aynı grupta malzemeler için standart sapma hesaplanmıştır. Benzer şekilde çekme deneyleri ve darbe deneyleri de 3'er kez tekrar edilmiş ve ortalamaları alınarak mekanik özellikler belirlenmiştir.

Numune isimlendirme sistemi:

0A1



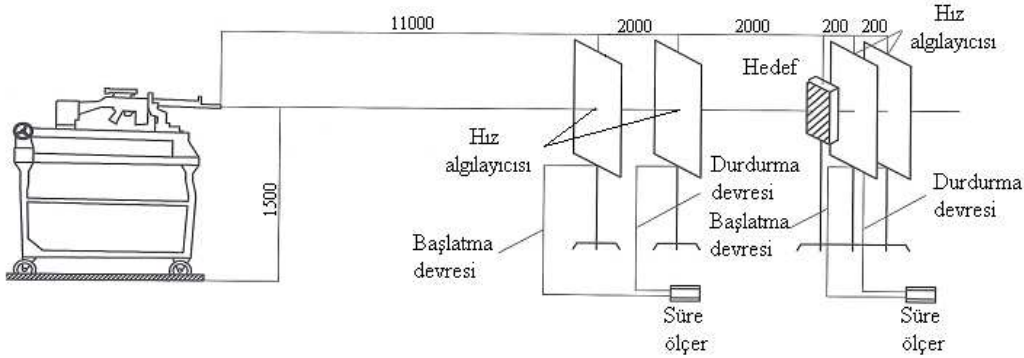
Böylece toplamda kompozit sistem de dahil olmak üzere 21 farklı ısıtıl işlem ve mekanik özellik koşulu denenmiştir. Beş farklı alan yoğunluğu ile birlikte hazırlanan malzemelerin özgün değişken sayısı 105'tir. Belirlenen her bir malzeme veya malzeme sistemi için 5 numune hazırlanmış ve toplamda 525 adet numune deneylerde kullanılmıştır. Tüm bu numuneleri ifade eden ve yukarıda verilen, bir numune isimlendirme sistemi kullanılmıştır.

4.4. Numunelerin İçyapı incelemeleri

Numuneler hazırlandıktan sonra içyapıları hem ışık mikroskopunda hem de taramalı elektron mikroskopunda incelenmiştir. Deneyler tamamlandıktan sonra da mikro incelemeler yine her iki mikroskop yöntemi ile de yapılmıştır. Alüminyum numunelerde ise tane sınırları ve tanelerin dizilimleri incelenmiştir.

4.5. Deney Düzeneginin Hazırlanması

Balistik deneylerin gerçekleştirilebilmesi için Şekil 4.5.1'deki deney düzenegi kurulmuştur. Silahın namlusundan 15 m uzağı hedef yerleştirilmiş hedefin 4 m önünde birinci hız algılayıcı sistemi ve hedefin hemen arkasında ikinci hız algılayıcı sistemi yerleştirilmiştir. Mermi giriş hızını ölçmek için tüfek namlusundan 11 m ileride 1. duyurga, 13 m ileride de ikinci duyurga sistemi bulunmaktadır. Mermi birinci duyurga düzeneğinden geçtiğinde zaman sayacı çalışmakta 2. duyurgadan geçtiğinde de durmaktadır. Böylece merminin 2 m yolu ne kadar zamanda aldığı ölçülüp mermi giriş hızı hesaplanmaktadır. Yine mermi çıkış bölgesinde hedeften 20 cm uzakta 1. duyurga, 40 cm uzaklıkta da ikinci duyurga bulunmaktadır. Bu sistemle de merminin çıkış hızı ölçülmektedir. Ancak çok gevrek numunelerde kırılan parçacıklar duyurga sistemlerine ulaştığından çıkış hızı ölçümleri çok sağlıklı yapılamamaktadır.



Şekil 4.5.1. Deney düzeneginin çizgesel gösterimi.

Balistik testlerin gerçekleştirilmesi için hedef numunelerini atış sırasında sabit tutacak bir düzeneğin imalatı gerçekleştirilmiştir. Hedef düzeneğinin tasarımında numunenin kolay bağlanıp çözülmesine ve atış sırasında sabit kalmasına dikkat edilmiştir. Mermi çıkış hızını ölçmek için hedef düzeneğinin arkasında iki adet çerçeve-duyarga sistemi kullanılmıştır. Şekil 4.5.2’de yapılan hedef düzeneğinin genel görünümü verilmiştir.

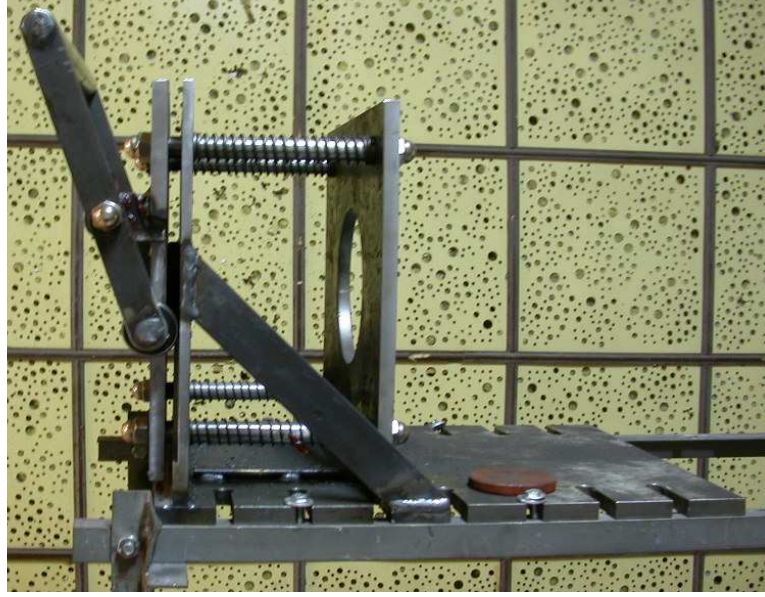


Şekil 4.5.2. Hedef düzeneğinin genel görünümü.

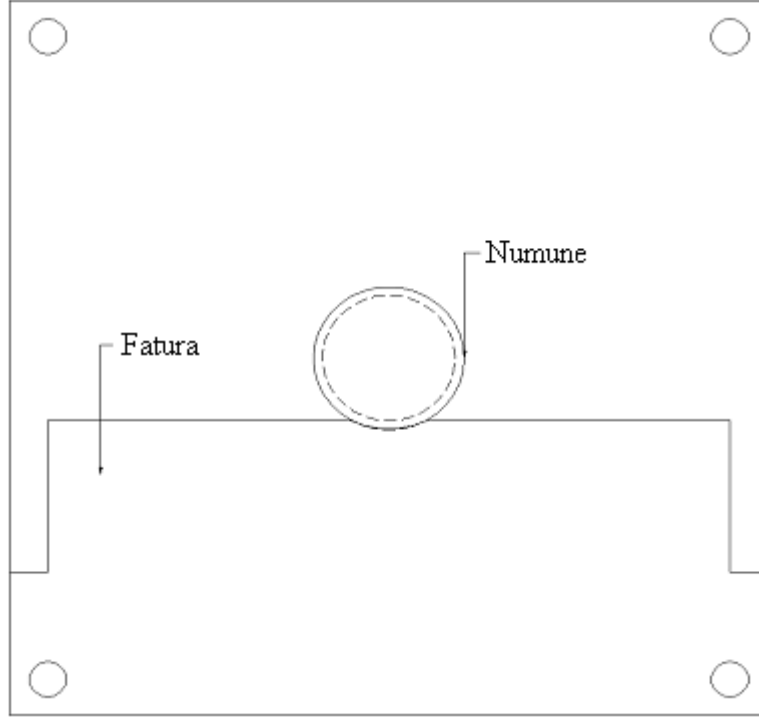
Hedef düzeneğinin önünde bulunan kol öne doğru çekildiğinde ön levha ile arka levhanın arası açılmaktadır ve arka levha üzerindeki faturaya numune yerleştirilip kol serbest bırakıldığında gerdirme yayları sayesinde numune iki levha arasına sıkışmaktadır. Atışlar sonrasında ön yüzde bulunan kol çekilerek denenmiş numune iki levha arasından çıkarılmaktadır. Şekil 4.5.3’de hedef düzeneğinin yan görünüşü verilmiş ve gerdirme yayları ile levhaların konumları gösterilmiştir.

Hedef düzenekte ortada görünen levhanın sol yüzünde bir fatura işlenmiş ve numunenin kolayca merkezlenmesi sağlanmıştır. Dört köşesinde bulunan deliklerden miller geçirilmiş ve bu levha ile arka levha arasına yay yerleştirilmiştir. Millerin diğer ucuna ise ön levha

bağlanmış ve böylece ön levha kendiliğinden sabit levhaya yaklaşmıştır. Ön levha üzerine yerleştirilen kolların ucuna masuralı rulman takılarak sabit levha üzerinde kaymaları sağlanmış böylece iki levha arasını açma işi kolaylaştırılmıştır. Şekil 4.5.4'de sabit levha üzerindeki faturanın şekli ve yerleştirilen numunenin konumu gösterilmiştir. Bu yöntemle levha üzerindeki delik ile hedef numunesi kendiliğinden merkezlenmektedir.



Şekil 4.5.3. Hedef düzeneğin yan görünüşü ve gerdirme yaylarının gösterimi.



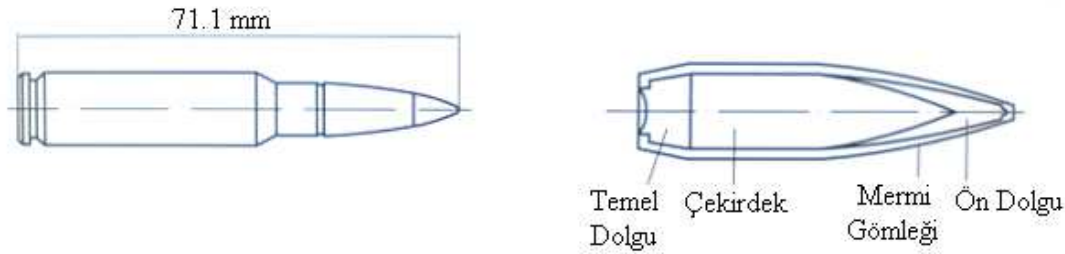
Şekil 4.5.4. Sabit levha üzerinde fatura şekli ve yerleşmiş numunenin gösterimi.

4.6. Balistik Deneylerin Gerçekleştirilmesi

Atışlar, Çizelge 4.5'te özellikleri belirtilen ve Şekil 4.6'da çizgesel gösterimi verilen 7,62 mm'lik zırh delici mermilerle, Kırıkkale Silahsan Silah Fabrikası atış poligonlarında gerçekleştirilmiştir. Herbir numuneye yalnızca bir kez ateş edilmiş ve aynı alan yoğunluğu, malzeme çeşiti ve mekanik özelliklere sahip herbir numuneden 5 adet denenmiştir. Böylece toplamda 525 atış gerçekleştirilmiştir. Mermi giriş ve çıkış hızları ölçülmeye çalışılmıştır. Mermilerin silahtan çıkış hızları ortalama $782 \pm 5,4$ m/s'dir. Bu çalışmada numunelerin balistik olarak başarılı sayılmaları tamamen delinmemiş ve merminin karşı tarafa geçmemiş olmasına bağlıdır. Temel kaynak noktası zırh malzemelerinin mermiyi geçirip geçirmemesidir.

Çizelge 4.6. 7,62 mm'lik zırh delici merminin bazı özellikleri [66].

Fişek uzunluğu	71,12±0,76 mm
Fişek ağırlığı	25,47±1,75g
Gömlek malzemesi	7,62x51 mm Pirinç (CuZn30)
Çekirdek malzemesi	DIN 100Cr6 (61-62 HRC)
Mermi ağırlığı	9,75±0,7g
Mermi uzunluğu	32,95 mm
Burun çeşiti	Konik (yarım koniklik açısı, $\alpha=17^\circ$)

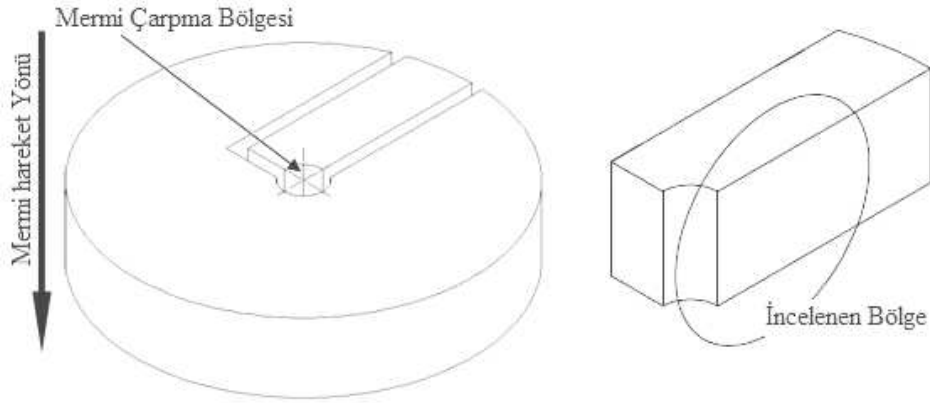


Şekil 4.6. 7,62 mm 'lik zırh delici merminin çizgesel gösterimi ve temel bileşenleri.

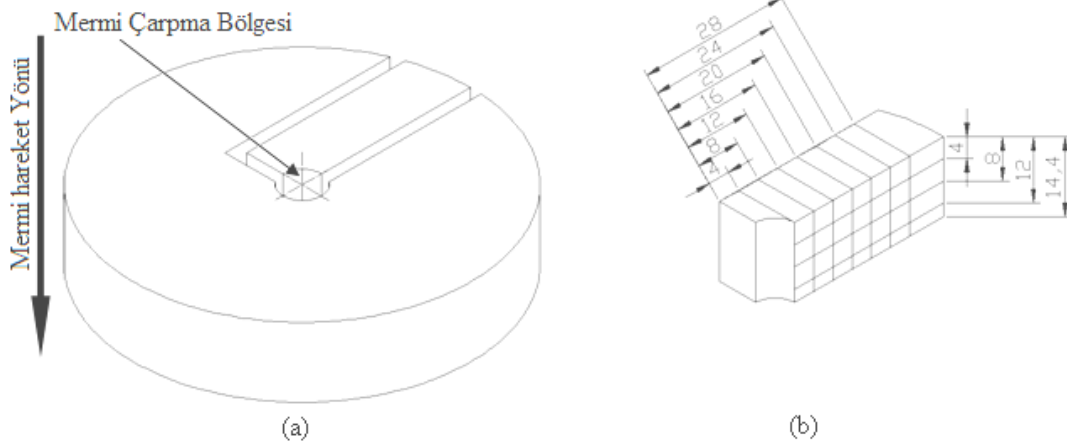
4.7. Balistik Olarak Denenen Numunelerin İncelenmesi

Balistik deneyleri tamamlanan numuneler için deneylerden sonra mikro ve makro incelemeler yapılmıştır. Numunelerin nasıl kırıldıkları, delinip delinmedikleri, mermi çıkış hızlarının balistik başarımları etkileyen faktörler açısından değerlendirilmesi yapılmıştır. Atışı yapılan her bir numune için makro boyutta delinip delinmediği, delinmişse sünek mi yoksa gevrek mi delindiği incelenmiştir. Ayrıca kırılmışsa çatlak ve kırıkların yön ve dizilimleri, kırılan numunelerin hangi yönde kırılmaya başladıkları, kaç parçaya ayrıldıkları, mermi eğer delip geçmişse delik kesitinin nasıl olduğu gibi gözlemler yapılmıştır. Yine makro boyutta deneylerden sonra mermi çekirdek ve gömleğinin ne durumda olduğu incelenmiştir. Mikro boyutta ise numunelerin mermi çarpma bölgesinde sertlik değişimleri ve mikro yapı değişiklikleri optik mikroskop, taramalı elektron mikroskopu ve odaklanmış iyon demeti yöntemi ile incelenmiştir. Hem numune ile merminin çarpışma bölgesinde hem de içyapıda EDS (Enerji dağılım spektroskopisi) analizleri yapılmıştır. Delinen, kırılan ya da başarılı olan

numunelerde merminin çarptığı bölgeden kesitler alınarak incelenmiş ve içyapıda ne gibi değişiklikler olduğu belirlenmiştir. Şekil 4.7.1’de numunelerin hangi bölgelerinden kesit alındığı gösterilmiştir. Alınan mikro sertlik değerlerinin ise numunenin hangi bölgesinden alındığı Şekil 4.7.2’de gösterilmiştir. Son olarak elde edilen deneysel sonuçlar analitik modellerde kullanılarak analitik yaklaşımlar ile deneysel sonuçların uyumluluğu ortaya konmuştur.



Şekil 4.7.1. Numunelerde incelenen bölgenin simgesel gösterimi.



Şekil 4.7.2. Numunelerde mikro sertlik alınan noktaların gösterimi.

BÖLÜM 5

5. DENEYSEL SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

5.1. Mekanik özellikler

Hazırlanan her bir numune üzerinden 3 adet sertlik ölçümü yapılarak ortalama sertlik değerleri ve standart sapma hesaplanmıştır. Sertlik ölçümlerinde çelik numuneler için Rockwell C, alüminyum numuneler için ise Brinell standartları kullanılmıştır. Sertlik değerleri aşağıda Çizelge 5.1.1 'de verilmiştir.

Çizelge 5.1.1. Numunelerin sertlik ve standart sapma değerlerinin gösterilmesi.

Numune Kodu	Sertlik (HRC)	Standart Sapma
0A	27,5	1,2
1A	37,8	0,9
1B	49,9	0,9
1C	53,4	1,1
1D	60	1,3
2A, 4A	39,5	1,5
2B, 4B	49,5	1,9
2C, 4C	52,5	1,6
2D, 4D	58,5	1,6
3A	40,4	1,6
3B	48,8	2,0
3C	57	2,0
3D	59,5	1,3
Numune Kodu	Sertlik (HB)	Standart Sapma
5A	85	1,4
6A	60	1,5
6B	170	1,3
6C	150	1,2

Hazırlanan numune grupları için standart çekme deneyi numuneleri hazırlanmış ve çekme deneyleri yapılmıştır. Her bir malzeme çeşiti, ısıl işlem ve sertlik için 3 adet çekme deney numunesi hazırlanarak ASTM standartlarına uygun olarak yapılan deneylerde akma, çekme dayanımları ve yüzde uzamalar belirlenmiştir. Çizelge 5.1.2 'de yapılan deneyler sonucu elde edilen sonuçlar verilmiştir.

Çizelge 5.1.2. Numunelerin akma, çekme dayanımları ve süneklik % uzama değerleri.

Numune kodu	Akma (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Süneklik Uzama (%)
0A	650	900	15,0
1A	1150	1450	17,0
1B	1250	1570	13,8
1C	1400	1640	12,7
1D	1500	1800	11,0
2A, 4A	1200	1550	13,7
2B, 4B	1300	1600	13,0
2C, 4C	1400	1775	12,1
2D, 4D	1550	1855	12,0
3A	1200	1570	12,3
3B	1300	1650	8,7
3C	1450	1800	6,0
3D	1600	1950	5,1
5A	190	300	16,0
6A	105	230	17,0
6B	500	570	11,0
6C	435	505	13,0

Yapılan deneyler sonucunda yüksek sertlik değerlerine sahip numunelerin aynı zamanda yüksek dayanım değerlerine de sahip oldukları görülmüştür. Bu durum Çizelge 5.1.1 ve 5.1.2'nin karşılaştırılmasıyla kolayca gözlemlenebilir.

Numunelerin akma ve çekme mukavemetlerinin bilinmesi kadar önemli bir diğer mekanik özellik ise darbe tokluğudur. Balistik deneyler sırasında doğrudan bir darbe etkisi söz konusudur. Bu bakımdan yüksek sertlik değerinin önemli olduğu kadar yüksek tokluk da önemlidir. Bilindiği gibi yüksek sertlik

değerlerinde malzemeler genel olarak gevrek davranış gösterirler. Böylece darbe sırasında merminin kinetik enerjisi numuneyi delmeye yetecek kadar yüksek olmasa bile çatlak oluşturabilecek ve çatlakların ilerlemesini sağlayabilecek kadar yüksek olabilir. Malzeme kırılır ve mermi kalan kinetik enerjisi ile yoluna devam eder ve dolayısıyla balistik koruma sağlanamamış olur. Bu durumu da irdeleyebilmek için balistik deneylerden önce numunelerin soğurdukları enerji miktarları standart Charpy çentik-darbe deneyi ile belirlenmiştir. Tüm numune çeşitleri için 3'er adet darbe numunesi hazırlanmış ve darbe deneyleri yapılmıştır. Darbe deneyleri sonunda numunelerin soğurdukları enerji miktarları joule cinsinden Çizelge 5.1.3'te verilmiştir.

Çizelge 5.1.3. Numunelerin darbe deneyleri sonucunda yuttukları enerji değerleri.

Numune Kodu	1.Deney (J)	2.Deney (J)	3.Deney (J)
0A	12,29	11,25	11,26
1A	42	48	-
1B	5,4	4,73	5
1C	5,4	3,54	4,47
1D	5	5,9	-
2A	13,9	13	14,8
2B	4,14	-	4,88
2C	3,67	4	4,14
2D	4,01	4,2	5,4
3A	8,78	7,96	8,37
3B	4,35	4,2	6
3C	4,33	3,14	4,07
3D	3	4,75	3
5A	24,51	30,78	32,29
6A	11,25	10,15	11,3
6B	9,33	8,2	6,67
6C	5,13	4,7	3,14

Seramik numuneler için mekanik özellikler daha önceki yıllarda yapılmış bir doktora çalışmasından aynen aktarılmıştır [67]. Buna göre deneylerde kullanılan alümina seramiklerinin özellikleri Çizelge 5.1.4'de verilmiştir.

Çizelge 5.1.4. Alüminanın mekanik özellikleri [67].

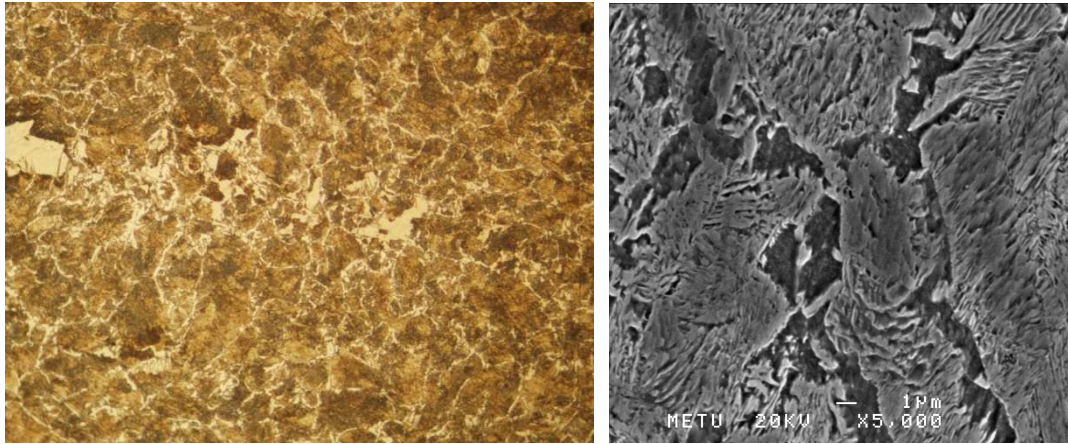
Saflık	% 99
Yoğunluk	3,8 g/cm ³
Sertlik	1365 HV
Basma Dayanımı	2,1 GPa
Eğme Dayanımı	330 MPa

Seramik levhaları yapıştırmak için kullanılan poliüretan bazlı yapıştırıcının çekme dayanımı ve kenar-kayma dayanım değerleri yine aynı doktora çalışmasından alınmıştır. Buna göre Sikaflex SF250'nin çekme dayanımı 1,4 MPa ve kenar-kayma dayanımı 0,7 MPa olarak belirlenmiştir.

5.2. İyapı İncelemesi

Deneyler için hazırlanan numunelerin iyapılarının incelenmesi için metalografik numuneler hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler hem ışık mikroskopunda hem de taramalı elektron mikroskopunda incelenmiştir. Düşük karbonlu 1050 alaşımsız çeliğinde pörlit yapı ve 4340 düşük karbonlu yüksek mukavemet düşük alaşım çeliğinde temperlenmiş martenzit yapıları gösterilmiştir. Alüminyum alaşımları için ise AA5083, AA7075 T0, AA7075 T651 ve AA7075 T7351 numuneleri metalografik inceleme için hazırlanmıştır. Şekil 5.2.1 'de hazırlanan numunelerden 1050 çeliğine ait ışık mikroskopu görüntüsü (a) ve taramalı elektron mikroskopu görüntüsü (b) verilmiştir. Bilindiği gibi 1050 çeliğinde sertleşebilirliği etkileyebilecek alaşım elementi olmadığı için sertleşebilirliği düşüktür. Bu nedenle yüzeyde temperlenmiş martenzit gözlemlenirken bu yapı derinlik arttıkça yerini pörlite bırakır. Bu bakımdan Şekil 5.2.1 'de verilen görüntüler numunenin dış yüzeyinden değil iç yüzeyinden alınmış görüntülerdir. İyapı ile mekanik özellikler karşılaştırıldığında da pörlit iyapıya sahip 1050 numunesinin darbe enerjisinin yüksek akma ve çekme mukavemetinin göreceli olarak düşük olduğu görülür. Şekil 5.2.2'de 4340 numunelerine ait ışık mikroskopu görüntüleri, Şekil 5.2.3'de ise taramalı elektron mikroskopu görüntüleri verilmiştir. Yine iyapı ve mekanik özellik karşılaştırılması yapılacak olursa temperlenmiş martenzit yapılarıdaki martenzit oranı arttıkça mekanik

özelliklerde de artış söz konusudur. Akma ve çekme dayanımları sürekli artarken darbe enerjileri azalmaktadır. Daha gevrek ve daha yüksek dayanımlı yapılar elde edilmektedir. Mekanik özellikler açısından önemli noktalardan biri de çelik malzemeler göz önüne alındığında 4340 çeliğinin hem akma ve çekme dayanımının hem de darbe enerjisinin yüksek olmasıdır. Bu bakımdan 4340 malzemesinin balistik başarımının göreceli olarak daha iyi olabileceği söylenebilir. Ancak balistik deneyler sırasındaki darbe etkisi ile standart deneyler sırasındaki darbe etkileri bir tutulamaz, bu nedenle yalnızca darbe enerjilerine ve dayanım değerlerine bakılarak net bir yargıda bulunulamaz.



(a)

(b)

Şekil 5.2.1. 1050 çeliğine ait içyapı resimleri. (a) Işık mikroskopu görüntüsü (X200), %5'lik nital dağlayıcı ile 15 s dağlanmış. Tane sınırlarında ferrit yapı tane içinde pörlit yapı görülmektedir. (b) Taramalı elektron mikroskopu görüntüsü (X5000), %5'lik nital dağlayıcı ile 15 s dağlanmış yapıda siyah bölgeler ferrit katmanlı yapılar pörlit yapıdadır. Tane içinde ferrit-sementit katmanlarından oluşan pörlit yapı net şekilde görülmektedir.



(a) 40 HRC sertlik, östenitleme sıcaklığı 860°C,

Menevişleme sıcaklığı 560°C ve süresi 2 saat. X 200, 15 s dağlama süresi,
%5'lik nital dağlayıcı.



(b) 50 HRC sertlik, östenitleme sıcaklığı 860°C,

Menevişleme sıcaklığı 450°C ve süresi 2 saat. X200, 15 s dağlama süresi,
%5'lik nital dağlayıcı.



(c) 55 HRC sertlik, östenitleme sıcaklığı 860°C,

Menevişleme sıcaklığı 400°C ve süresi 2 saat. X200, 15 s dağlama süresi,
%5'lik nital dağlayıcı.

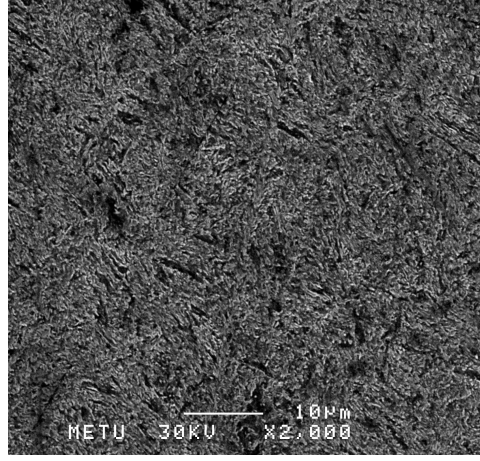


(d) 60 HRC sertlik, östenitleme sıcaklığı 860°C,

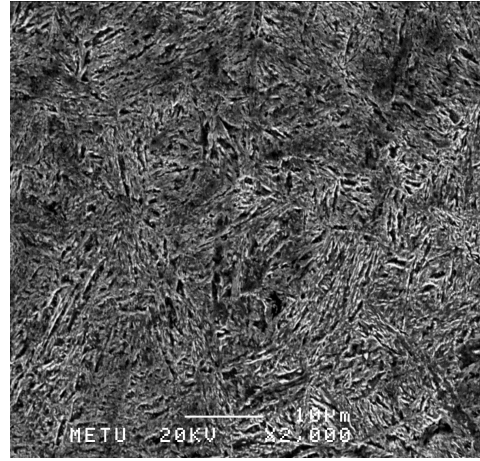
Menevişleme sıcaklığı 250°C ve süresi 2 saat. X200, 15 s dağlama süresi,

%5'lik nital dağlayıcı.

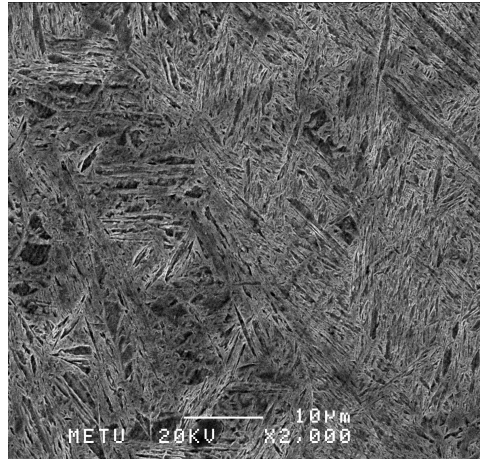
Şekil 5.2.2. 4340 numunelerinin içyapı görüntüleri. Tüm numunelerde temperlenmiş martenzit yapı görölmektedir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 5.2.3. 4340 numunelerinin taramalı elektron mikroskopi görüntüleri. Tüm numunelerde menevişlenmiş martenzit görülmektedir (a) 40HRC, (b) 50 HRC, (c) 60 HRC.

Şekil 5.2.4’de ise deneylerde kullanılan alüminyum alaşımlarından AA 5083’e ait içyapı görüntüleri, Şekil 5.2.5’de ise AA7075’in farklı ısıl işlem koşullarındaki içyapı resimleri verilmiştir.



Şekil 5.2.4. Alüminyum alaşımı 5083’ün içyapı görünümü.



(a)



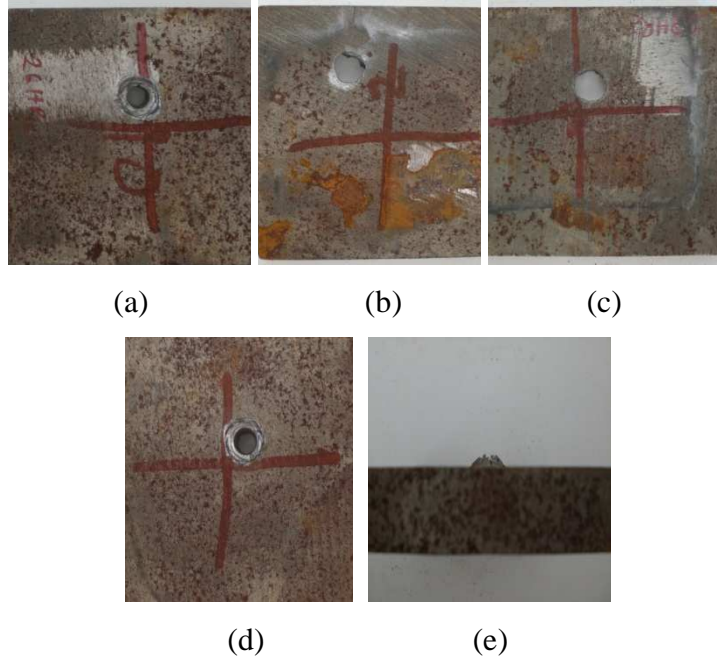
(b)

Şekil 5.2.5. AA7075’in yaşlandırılmış koşuldaki (T651) ve aşırı yaşlandırılmış koşullardaki (T7351) içyapı görüntüleri.

5.3. Balistik Deneyler Sonrası Makro İnceleme

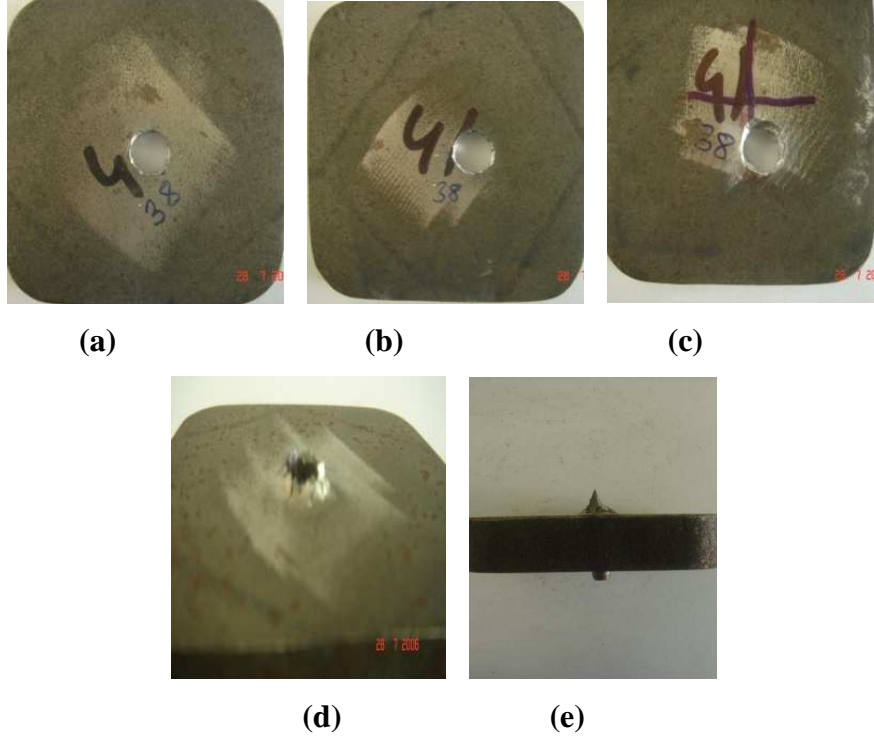
Hazırlanan numunelerin tamamının atışları 7,62 mm'lik zırh delici mermilerle Kırıkkale Silahsan Silah Fabrikası atış poligonlarında tamamlanmıştır. Toplam 525 numunenin atışı gerçekleştirilmiştir. Atış sonrası numunelerin makro incelemesi aşağıda verilmiştir.

0A numuneleri için; Deney yapılan tüm numuneler sünek delinirken, merminin çıkışı yönünde tepecikler oluşmuştur. Şekil 5.3.1 'de bu durum gösterilirken (e), denenen numunelerin tamamının deney sonrası görüntüleri verilmiştir.



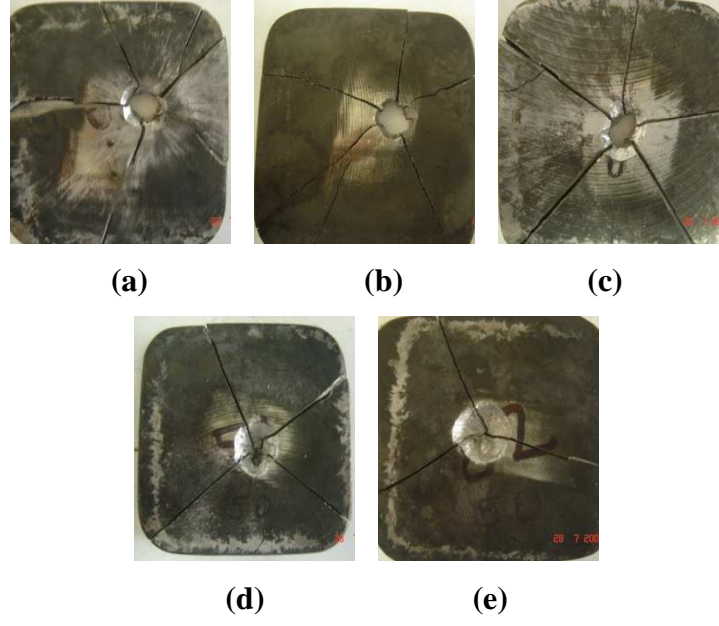
Şekil 5.3.1. 0A numunelerinin deney sonrası görüntüleri. (a)-(e) sırasıyla 1.-5. alan yoğunluklarına sahip numuneler.

1A numuneleri için; 5. alan yoğunluğu hariç tüm numuneler sünek şekilde delinmiştir. 5. alan yoğunluğunda mermi çekirdeğinin ucu numunenin diğer tarafından çıkmıştır ancak delip geçememiştir. Şekil 5.3.2'de 1A numunelerinin deneyler sonrasındaki resimleri verilmiştir.



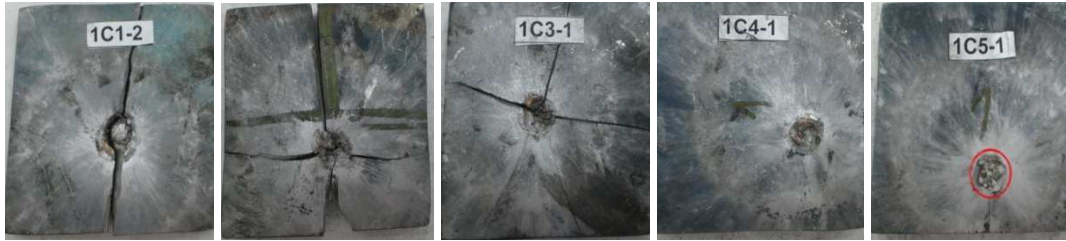
Şekil 5.3.2. 1A numunelerinin deney sonrası görüntüleri. En düşük alan yoğunluğundan (a), en yüksek alan yoğunluğuna (e) numunelerin gösterimi.

1B numuneleri için; ilk üç alan yoğunluğunda numuneler delinmiştir. Bu numunelerde gevrek delinme ve kırılma gözlemlenirken bu seride yer alan son iki alan yoğunluğundaki numunelerde delinme gözlemlenmemesine rağmen kırılma gerçekleşmiştir. Kırılma sonrası oluşan parça sayısı numunenin kalınlığına bağlı olarak değişmektedir. 10,8 mm kalınlığındaki numuneler 5 parçaya 12,7 mm kalınlığındaki numuneler 4 parçaya ve 14,4 mm kalınlığındaki numuneler 3 parçaya bölünmüştür. Şekil 5.3.3 'de bu durum gösterilmiştir.



Şekil 5.3.3. 1B numunelerinin deney sonrası görüntüleri. Kalınlık artıkça kırılmış parça sayısı azalmaktadır. (Soldan sağa sırasıyla 1., 2., 3., 4. ve 5. alan yoğunluklarındaki numuneler.)

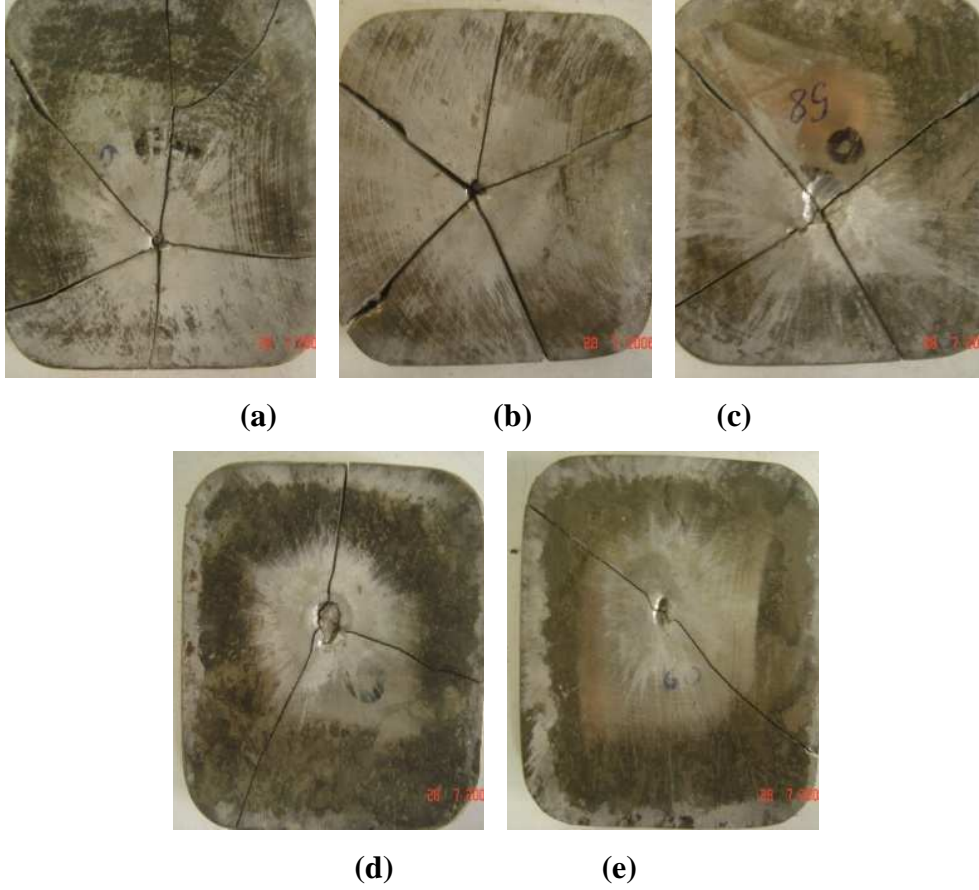
1C numuneleri için; son iki alan yoğunluğunda numuneler delinmemiştir. Arka yüzlerinde çatlak oluşmamıştır. Merminin çarptığı bölgede bakır mermi gömleği çekirdekten sıyrılarak numuneye yapışmıştır. İlk üç alan yoğunluğunda numuneler gevrek delinmiş ve kırılmıştır. Şekil 5.3.4 'de numunelerin deney sonrası resimleri verilmiştir.



Şekil 5.3.4. 1C numunelerinin deney sonrası görüntüleri. 4. ve 5. alan yoğunluklarında bakır gömleğin sıyrıldığı bölge kırmızı daire içinde gösterilmiştir. (Soldan sağa sırasıyla 1., 2., 3., 4. ve 5. alan yoğunluklarındaki numuneler.)

1D numuneleri için; 1. alan yoğunluğunda numuneler 6 parçaya, 2. alan yoğunluğunda 5 parçaya, 3. alan yoğunluğunda 4 parçaya ve kalan alan yoğunluklarında 3 parçaya bölünmüştür. 5. alan yoğunluğunda numuneler delinmemiş ve kırılmamıştır. Arka yüzlerinde

çatlak oluşmamıştır. Bu atışlarda mermi çekirdeği kırılmıştır. Deney sonrasındaki numune görüntüleri ve kırılan mermi çekirdeği Şekil 5.3.5 ve 5.3.6 'da gösterilmiştir.

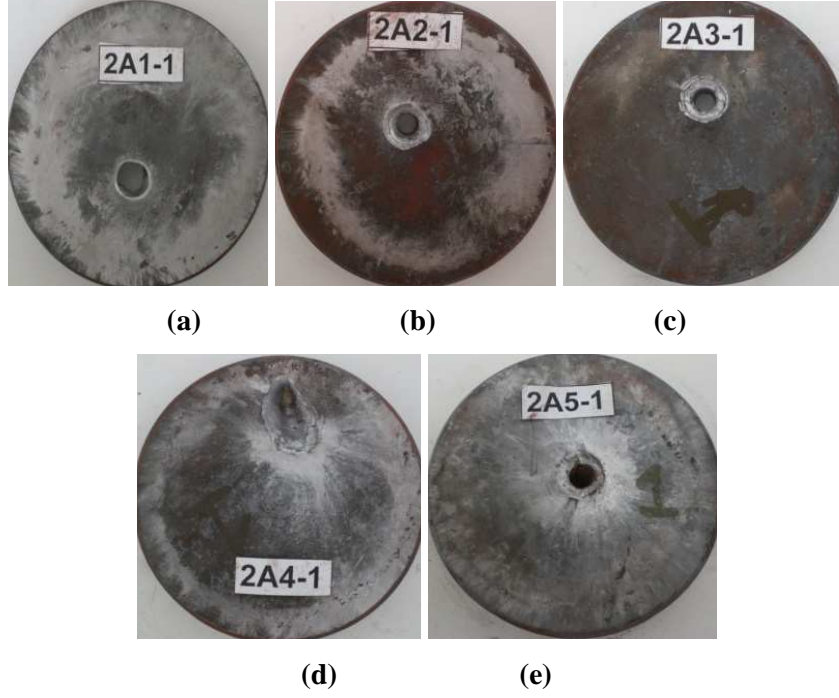


Şekil 5.3.5. 1D numunelerinin deney sonrası görüntüleri. Numune kalınlığı arttıkça kırılma sonrası oluşan parçacık sayısı azalmaktadır. (Soldan sağa sırasıyla 1. , 2. , 3. ve 4. alan yoğunluklarındaki numuneler.)

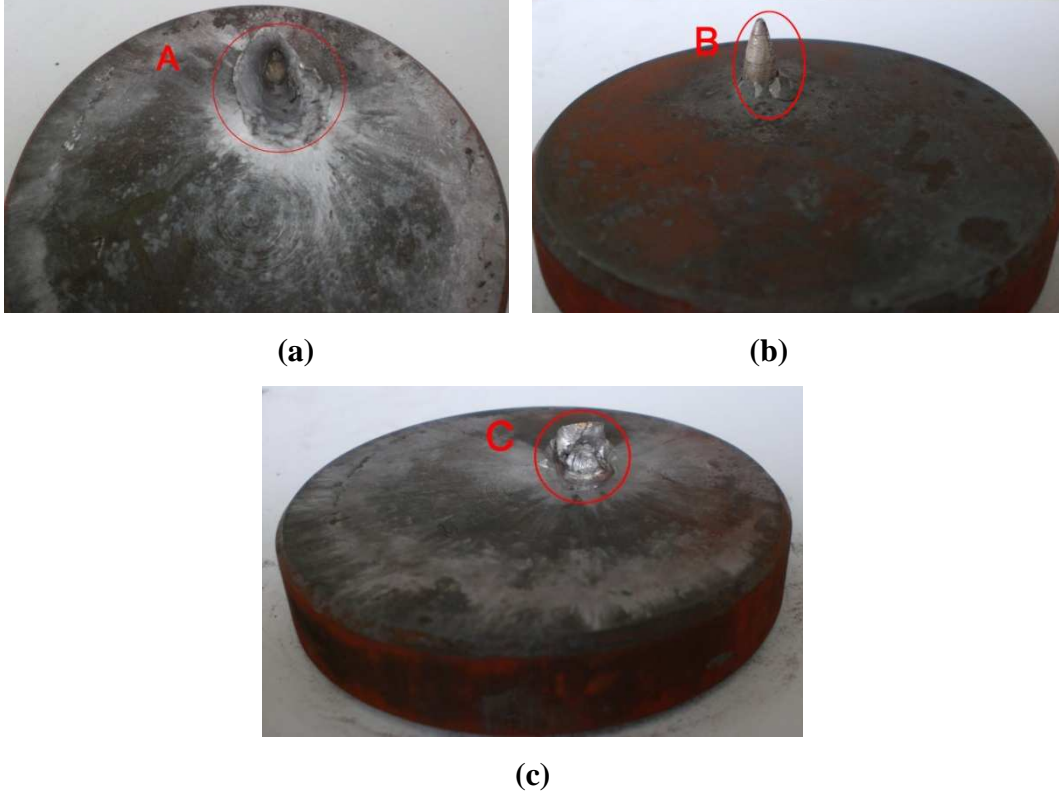


Şekil 5.3.6. 1D numunesinin 5. alan yoğunluğundaki deney sonrası görüntüsü. Numune kırılmamış ve delinmemiştir. Arka yüzünde çatlak oluşmazken (ortada), mermi çekirdeği parçalanmıştır (solda).

2A numuneleri için; Deney yapılan numunelerin tamamı delinirken, 4. alan yoğunluğunda tekrarlanan 5 atıştan 3'ünde numuneler delinmemiştir. Ayrıca 5. alan yoğunluğunda tıpkı 1A numunelerinin 5. alan yoğunluğunda olduğu gibi mermi çekirdeği numunenin arka tarafından çıkmasına rağmen delip geçememiş ve kırılmıştır. Şekil 5.3.7'de 1. alan yoğunluğundan (a) 5. alan yoğunluğuna (e) doğru numunelerin deney sonrası resimleri ile birlikte Şekil 5.3.8'de adı geçen delinmeyen numunelerde mermi çekirdeğinin etkisi gösterilmiştir.

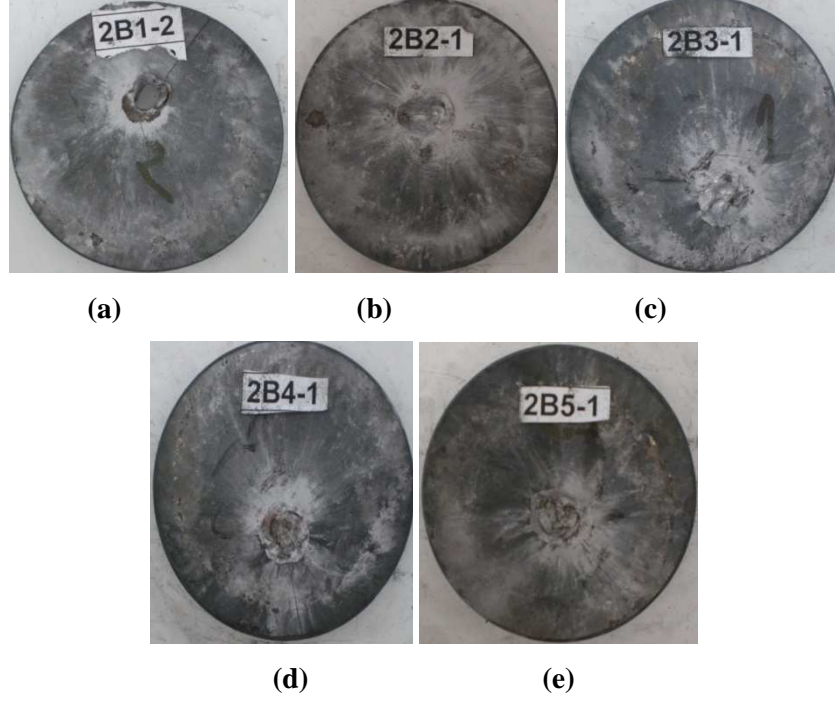


Şekil 5.3.7. 2A numunelerinin deneyler sonrasındaki görünüşleri. Sırasıyla (a)'dan (e)'ye 1.'den 5. alan yoğunluğuna numuneler.

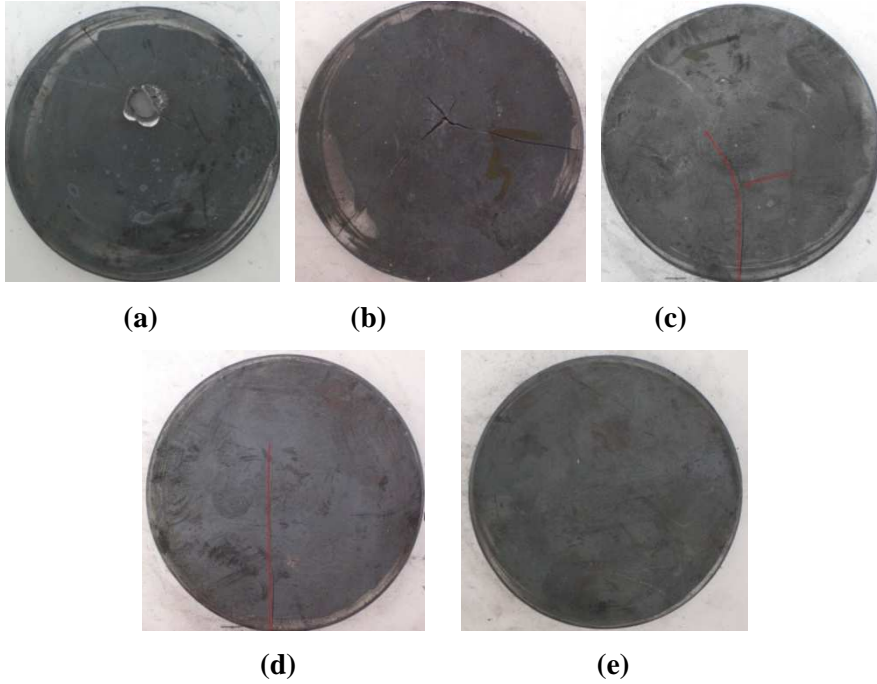


Şekil 5.3.8. 2A numunelerinde 4. ve 5. alan yoğunluklarında karşılaşılan delinmemelerinin gösterilmesi. (a) 'da mermi hedef çarpışmasından sonra merminin diklik etkisini yitirip eğik olarak numuneye girmeye çalıştığı görülmekteyken, (b) ve (c)'de ise 5. alan yoğunluğunda hedefin diğer tarafından ucu çıkan (b) ve kırılan (c) mermi çekirdeği gösterilmiştir.

2B numuneleri için; 1. alan yoğunluğunda tüm numuneler sünek şekilde delinirken, 2. alan yoğunluğundan itibaren hiçbir numune delinmemiştir. Ancak numunelerin arka yüzlerinde derin çatlaklar olduğu gözlemlenmiştir. Numune kalınlığı arttıkça çatlak oluşumu azalmış ve sonunda 5. alan yoğunluğunda hiç çatlak gözlenmemiştir. Merminin hedefe çarptığı noktada bakır gömlek mermi çekirdeğinden sıyrılarak numunenin üzerine yapışmıştır. Şekil 5.3.9'da denenen numunelerin ön yüzleri sırasıyla 1. alan yoğunluğundan (a) 5. alan yoğunluğuna (e) doğru verilmiştir. Şekil 5.3.10 'da ise denemiş numunelerin aynı sıra ile arka yüzlerindeki çatlak oluşumları gösterilmiştir.

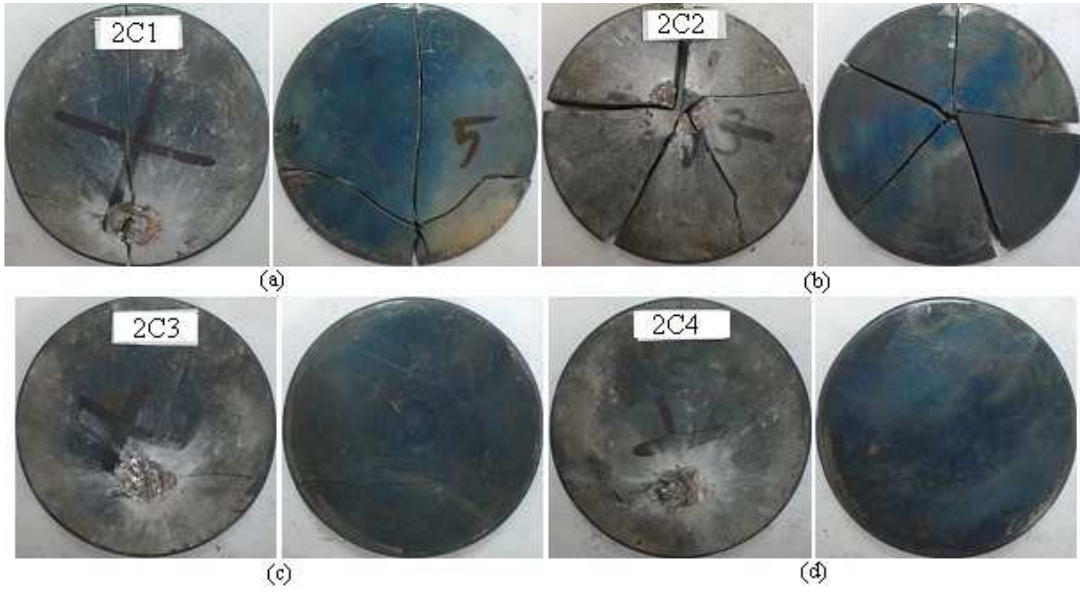


Şekil 5.3.9. 2B numunelerinin deney sonrası 1. alan yoğunluğundan(a) 5. alan yoğunluğuna sırasıyla ön yüz görüntüleri.



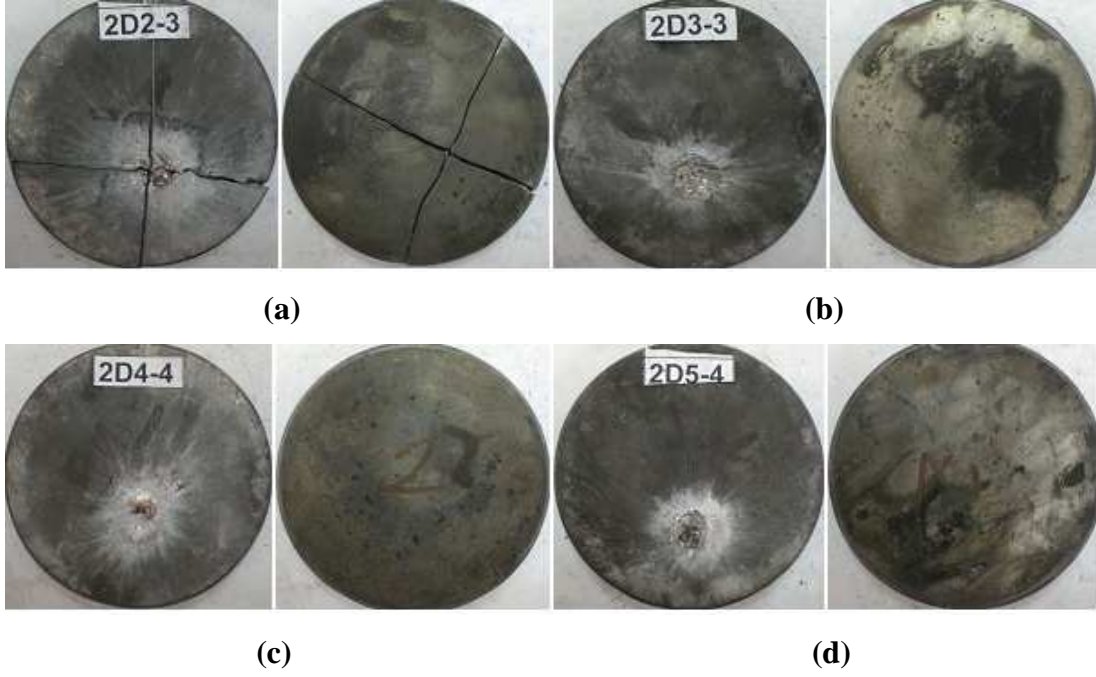
Şekil 5.3.10. 2B numunelerinin deney sonrası 1. alan yoğunluğundan(a) 5. alan yoğunluğuna sırasıyla arka yüz görüntüleri. 2. alan yoğunluğunda çok daha derin çatlaklar oluşurken 3. alan yoğunluğunda iki yönlü ve daha sık çatlak oluşmuştur. 4. alan yoğunluğunda tek yönlü derin olmayan çatlak oluşmuş ve 5. alan yoğunluğunda ise çatlak oluşmamıştır.

2C numuneleri için, ilk iki alan yoğunluğunda tüm numuneler delinirken 3. alan yoğunluğundan itibaren numuneler tam balistik koruma sağlamıştır. İlk iki alan yoğunluğunda numuneler birçok parçaya ayrılırken 3. alan yoğunluğunda her numune tam koruma sağlamıştır ancak hem ön hem de arka yüzde çatlak oluşmuştur. 4. ve 5. alan yoğunluklarında herhangi bir çatlak görülmemiştir. Şekil 5.3.11 'de ilk dört alan yoğunluğundaki numunelerin ön ve arka yüz görüntüleri sunulmuştur.



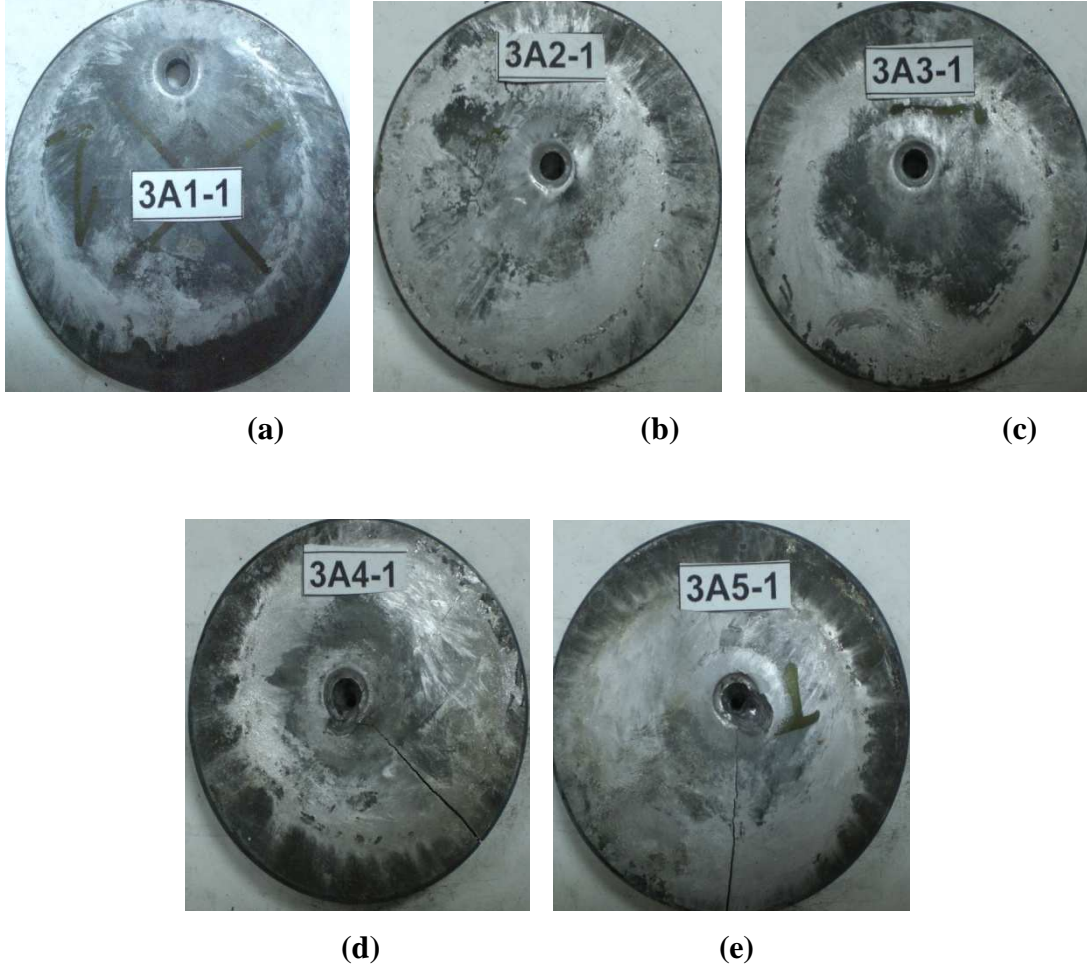
Şekil 5.3.11. 2C numunelerinin en düşük alan yoğunluğundan (a) en yüksek alan yoğunluğuna (d) doğru sıralanmış balistik deneyler sonucundaki ön ve arka yüz görünüşleri. İlk iki alan yoğunluğundaki numuneler delinmeyip bir çok parçaya kırılarak başarısız olurken (a ve b), son üç alan yoğunluğunda numuneler delinmemiş ve kırılmamıştır (c ve d). 3. alan yoğunluğunda numunelerin ön ve arka yüzlerinde derin olmayan çatlaklar görülmüştür (c).

2D numuneleri için; 3. alan yoğunluğundan itibaren tam balistik koruma sağlanmıştır. İlk iki alan yoğunluğunda ise numuneler çok sayıda parçaya ayrılmış ve başarısız olmuştur. Balistik koruma sağlayan numunelerin ön ve arka yüzlerinde herhangi bir çatlak oluşumu gözlenmemiştir. Şekil 5.3.12 'de 2D numunelerine ait ön ve arka yüz görüntüleri verilmiştir. İlk alan yoğunluğundaki numuneler bir arada tutulamayacak kadar çok parçaya ayrıldığından resmedilemezken 2. alan yoğunluğundan itibaren başarılı ve başarısız numunelerin ön ve arka yüz görüntüleri sunulmuştur.

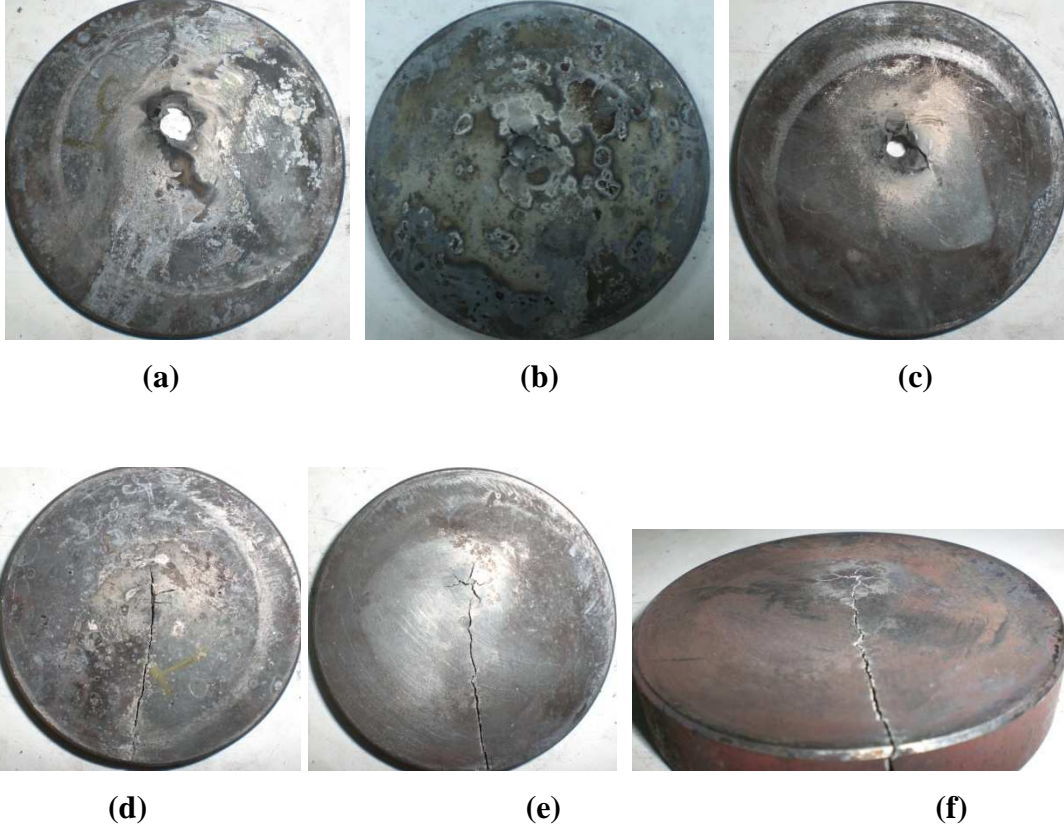


Şekil 5.3.12. 2D numunelerinin düşük alan yoğunluğundan (a) en yüksek alan yoğunluğuna (d) doğru sıralanmış balistik deneyler sonucundaki ön ve arka yüz görüntüleri. İlk iki alan yoğunluğundaki numuneler delinmeyip birçok parçaya kırılarak başarısız olurken (a), son üç alan yoğunluğunda numuneler delinmemiş ve kırılmamıştır (b, c ve d). 3. alan yoğunluğundan itibaren numunelerin ön ve arka yüzlerinde çatlak görülmemiştir.

3A numuneleri için; 5. alan yoğunluğu hariç tüm numuneler sünek şekilde delinmiştir. Numunelerde 3. alan yoğunluğundan sonra ön ve arka yüzde çatlaklar görülmüştür. Özellikle 5. alan yoğunluğunda numune delinmemesine karşın hem ön hem de arka yüzünde ciddi hasarlar görülmüştür. Şekil 5.3.13 'de numunelerin ön yüz görüntüleri en küçük alan yoğunluğundan (a) en büyük alan yoğunluğuna (e) doğru sırasıyla verilmiştir. Şekil 5.3.14 'de ise yine aynı sıralama ile arka yüz görüntüleri ve çatlak oluşumları gösterilmiştir.

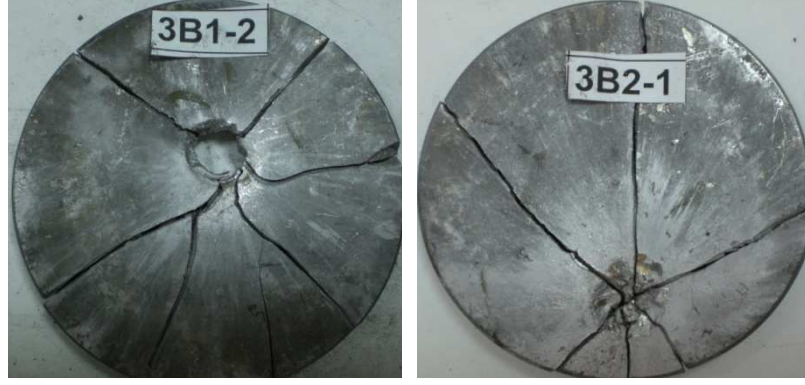


Şekil 5.3.13. 3A numunelerinin en düşük alan yoğunluğundan (a) en yüksek alan yoğunluğuna (e) doğru sıralanmış balistik deneyler sonucundaki görünüşleri. (e) hariç tüm numuneler sünek şekilde delinirken (e) delinmemiş ancak numunenin ön yüzünde de derin çatlaklar oluşmuştur.



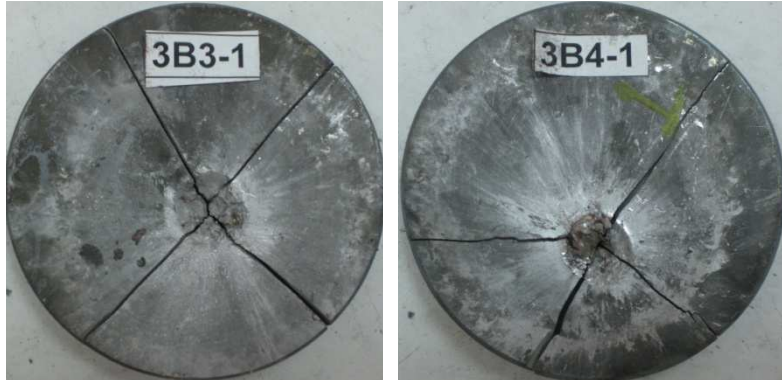
Şekil 5.3.14. 3A numunelerinin deney sonrası arka yüzlerinin görüntüleri. İlk üç alan yoğunluğunda (a-c) sünek delinme gerçekleşirken son iki alan yoğunluğunda (d-e) numune delinmemiştir. (f)'de oluşan derin çatlak resmedilmiştir.

3B numuneleri için; tüm numuneler gevrek şekilde kırılırken, 2. alan yoğunluğundan itibaren numuneler delinmemiş ancak parçalanmıştır. Numune kalınlığı arttıkça kırılan parça sayısı azalmıştır. İlk dört alan yoğunluğunda numuneler 4 parçaya bölünürken, 5. alan yoğunluğunda numuneler 2 ya da 3 parçaya bölünmüştür. Şekil 5.3.15'de 3B numunelerinin ön yüzlerinin deney sonrası görüntüleri verilirken, Şekil 5.3.16'da aynı grup numunelerinin arka yüz görüntüleri sunulmuştur.



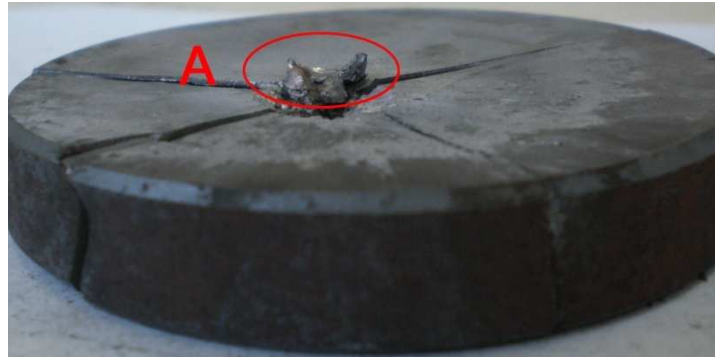
(a)

(b)



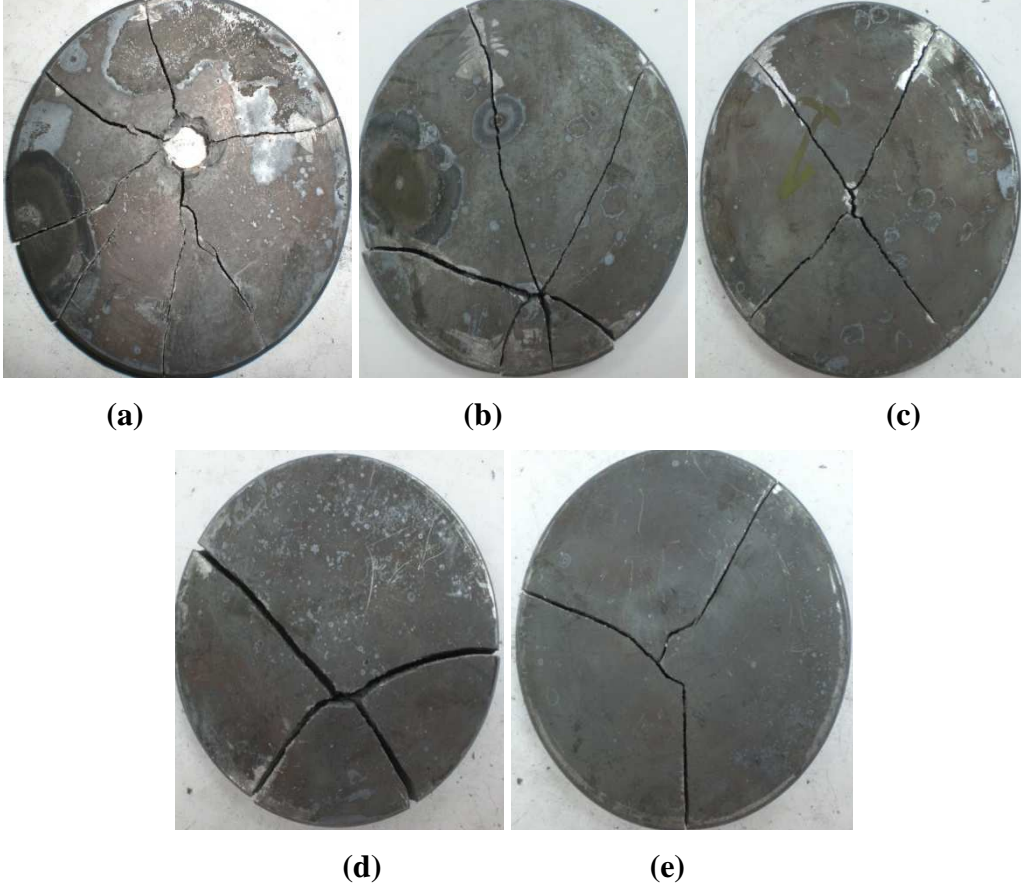
(c)

(d)



(e)

Şekil 5.3.15. 3B numunelerinin 1. alan yoğunluğundan (a) 5. alan yoğunluğuna (e) kadar deney sonrası ön yüz görüntüleri ile (e)'de A detayı ile çarpışma yüzeyine sıvanmış bakır gömlek sunulmuştur.



Şekil 5.3.16. 3B numunelerinin 1. alan yoğunluğundan (a) 5. alan yoğunluğuna (e) kadar deney sonrası arka yüz görüntüleri.

3C numuneleri için, ilk dört alan yoğunluğundaki numunelerin tamamı delinmemiş ancak parçalanarak başarısız olmuştur. 5. alan yoğunluğundaki bir tek numune başarılı olurken diğer 4 numune de kırılmıştır. Alan yoğunluğu arttıkça numunelerin kırık ve çatlak sayısı azalmıştır. Şekil 5.3.17 'de 3C grubu numunelere ait ön yüz görüntüleri verilmiştir.



Şekil 5.3.17. 3C numunelerinin en düşük alan yoğunluğundan (a) en yüksek alan yoğunluğuna (e) doğru sıralanmış balistik deneyler sonucundaki ön yüz görünüşleri. 5.alan yoğunluğu hariç tüm numuneler delinmemiş ancak kırılarak başarısız olmuştur (a b, c ve d).

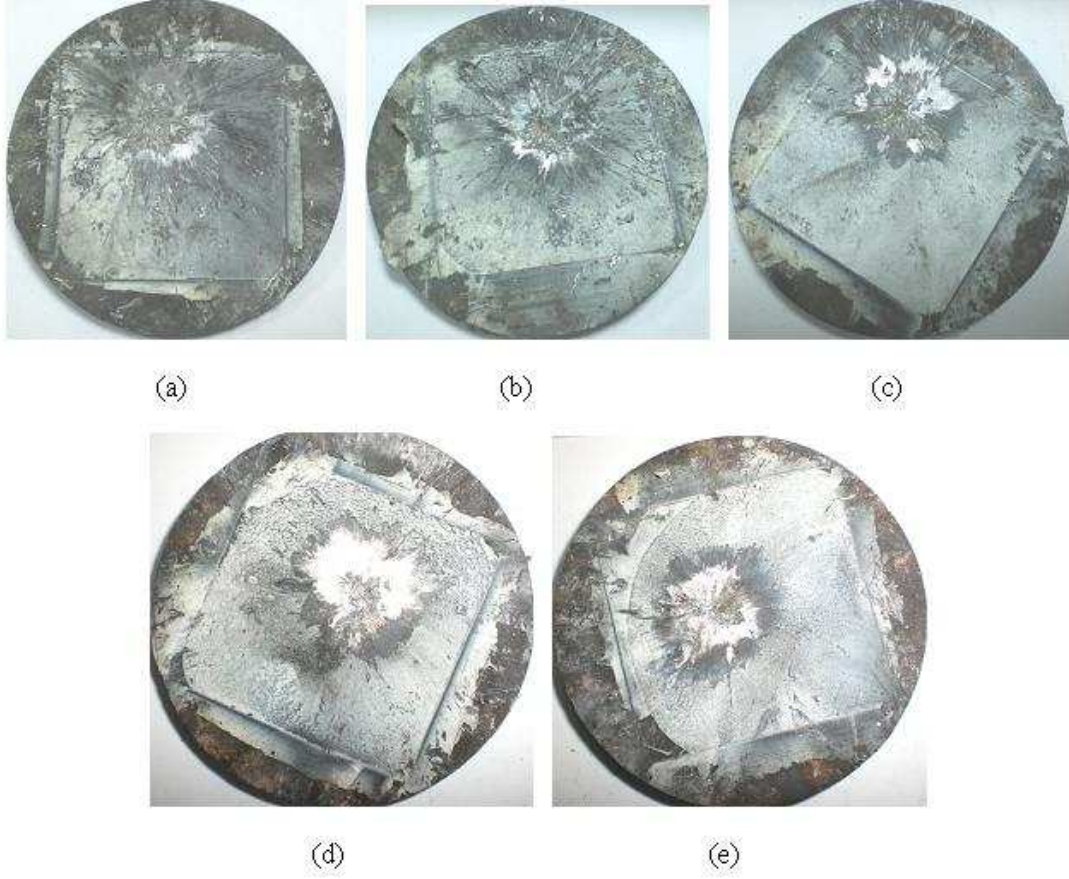
5.Alan yoğunluğunda yalnızca bir numune başarılı olmuştur. (e)

3D numuneleri için, 3C numunelerine benzer bir durumla karşılaşmıştır. 5. alan yoğunluğu hariç tüm numuneler delinmemiş fakat gevrek şekilde parçalanmıştır. 5. alan yoğunluğunda ise atışı yapılan 5 numuneden 3'ü başarılı olmuştur. Şekil 5.3.18 'de numunelere ait ön yüz görüntüleri verilmiştir. Alan yoğunluğu arttıkça kırılan parça sayısı da azalmıştır.



Şekil 5.3.18. 3D numunelerinin düşük alan yoğunluğundan (a) en yüksek alan yoğunluğuna (d ve e) doğru sıralanmış balistik deneyler sonucundaki ön yüz görüntüleri. 5.alan yoğunluğu hariç tüm numuneler delinmemiş ancak kırılarak başarısız olmuştur (a, b ve c). 5.Alan yoğunluğunda atışı yapılan 5 numuneden 3'ü başarılı olmuştur. (d ve e)

4A numuneleri için; birinci alan yoğunluğunda tüm numuneler başarılı olmuştur. Ancak birinci ve ikinci alan yoğunluklarında denenen numunelerin arka yüzlerinde belirgin şişmeler olmuştur. Bu grup numuneler ait ön yüz görüntüleri Şekil 5.3.19'da arka yüz görüntüleri ise Şekil 5.3.20'de verilmiştir.



Şekil 5.3.19. 4A numunelerine ait balistik deneyler sonrası ön yüz görüntüleri. Tüm alan yoğunlularındaki numuneler tam koruma sağlamıştır. Seramik katman parçalanmıştır ancak destek çelik katman merminin geçmesine izin vermemiştir.

Mermi ile numunelerin karşılaşmasından hemen sonra seramik katman parçalanarak dağılmasına rağmen çelik arka katman mermiyi durdurabilmiştir. Çarpışma sonrası dağılan seramik parçacıklarının ve metal arka katmanın görüntüleri Şekil 5.3.21’de sunulmuştur.

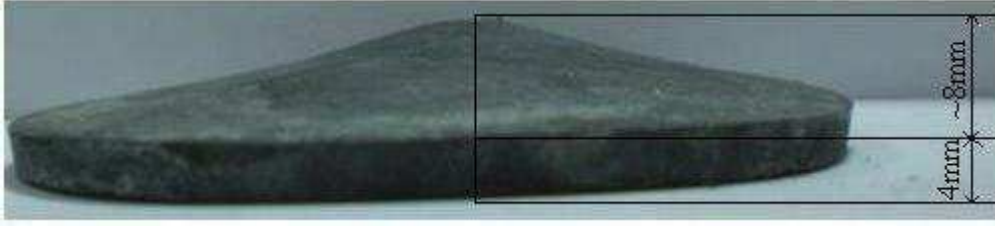
1.grup numunelerde belirtilen şişmenin miktarı Şekil 5.3.22’de sunulmuştur. Numune kalınlığı arttıkça merminin çarpmasıyla şekil alan tepecik yüksekliği azalmıştır.



Şekil 5.3.20. 4A numunelerinin 1. alan yoğunluğundan (a) 5. alan yoğunluğuna (e) kadar deney sonrası arka yüz görüntüleri.



Şekil 5.3.21. Zırh delici mermi çarptıktan sonra katmanlı kompozit zırhın görüntüsü. Seramik katman parçalanıp destek katmandan ayrılırken destek katman balistik korumayı sağlamıştır.



a)

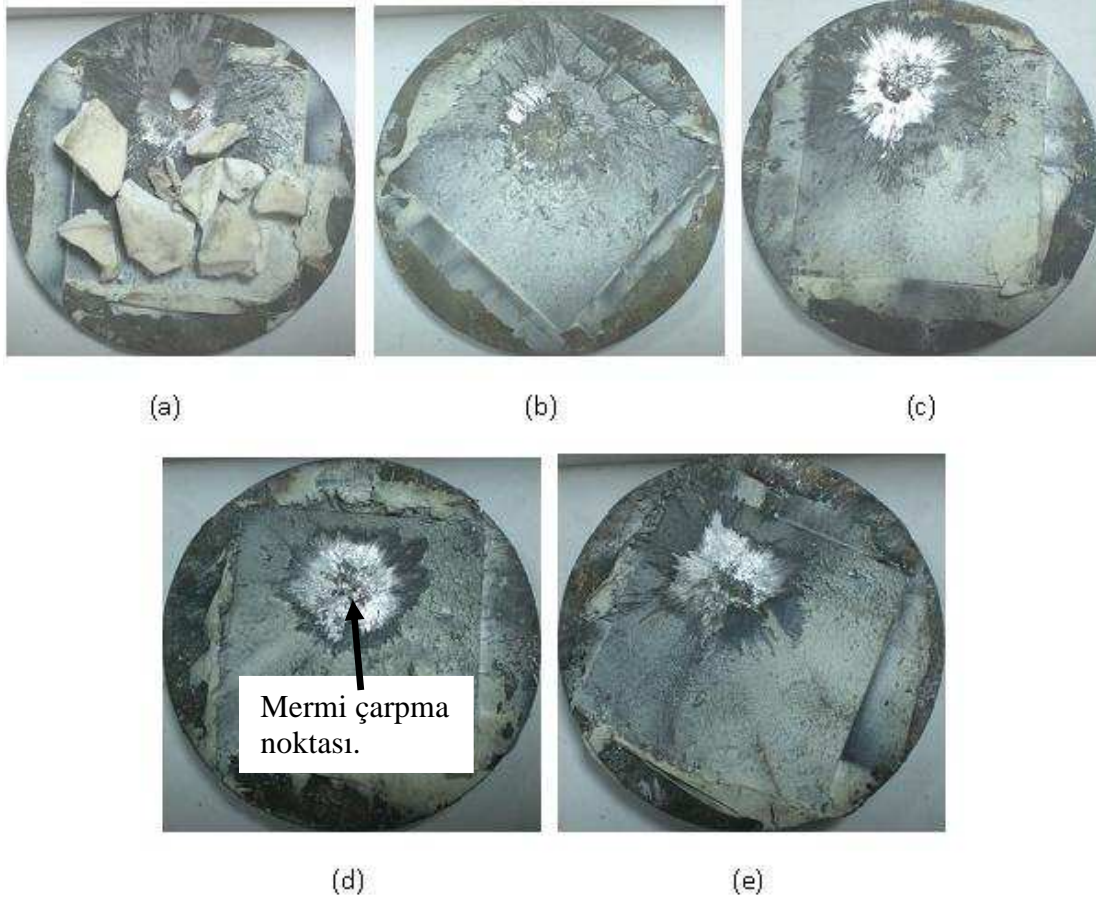


b)

Şekil 5.3.22. 4A grubu zırhlarda balistik deneyler sonrasında oluşan şişme tepciklerinin a)55 ve b)70 kg/m² alan yoğunluğundaki numuneler için gösterimi. Artan alan yoğunluğu ile birlikte şişme miktarı da azalmıştır.

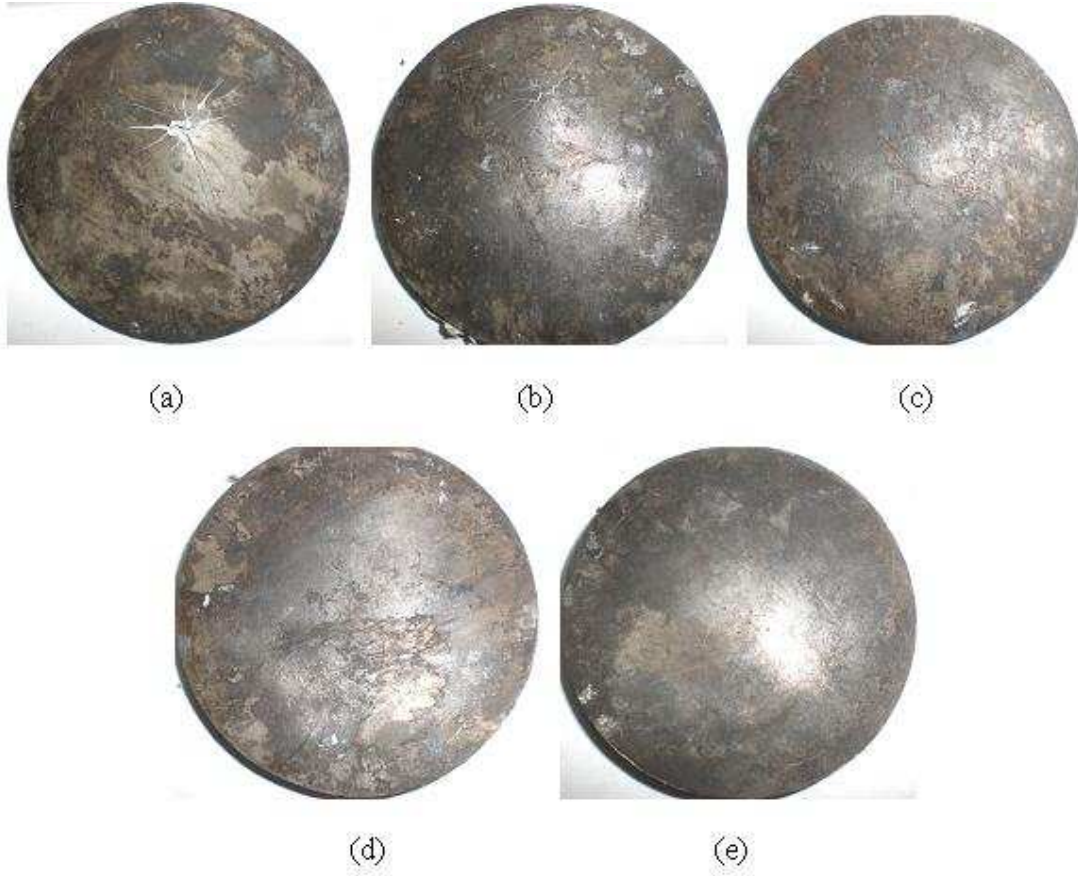
4B numuneleri için; birinci alan yoğunluğunda ateş edilen 5 numuneden 3'ü delinirken diğer tüm alan yoğunluklarında tüm numuneler tam balistik koruma sağlamıştır. Şekil 5.3.23'de 4B numunelerinin balistik deneyler sonrasında ön yüz görüntüleri verilmiştir.

4C numuneleri için; 1.alan yoğunluğunda ateş edilen numunelerden beş tanesinden ikisinde mermi numuneyi delip geçemese de kırmayı başarmıştır (hem seramik katmanı hem de metal destek katmanı). Diğer 3 numunede ise kırılma ve delinme olmamış, fakat arka yüzünde bazı çatlaklar oluşmuştur. Bu durum Şekil 5.3.24'de gösterilmiştir. Diğer tüm alan yoğunlukları için numuneler tam balistik koruma sağlamıştır.



Şekil 5.3.23. 4B numunelerinin balistik deneyler sonrasındaki görüntüleri. 1.alan yoğunluğunda numunelerden üçü (a)'da görüldüğü gibi sünek şekilde delinmiştir.

4D grubu numuneler için; 55 kg/m^2 alan yoğunluğunda tüm numuneler delinirken ikinci alan yoğunluğunda (70 kg/m^2) ateş edilen 5 numuneden ikisinde mermi numuneyi delip geçmemesine rağmen kırılmış, üçünde ise delinmemiş ve kırılmamıştır ancak arka yüzünde çatlaklar belirmiştir. 3.alan yoğunluğunda (kg/m^2) numunelerden yalnızca birinde arka yüzde çatlak oluşumu gözlenmiştir (Şekil 5.3.25). 4. ve 5. alan yoğunluğunda numuneler delinmemiş ve kırılmamış ve böylelikle tam balistik koruma sağlamıştır.

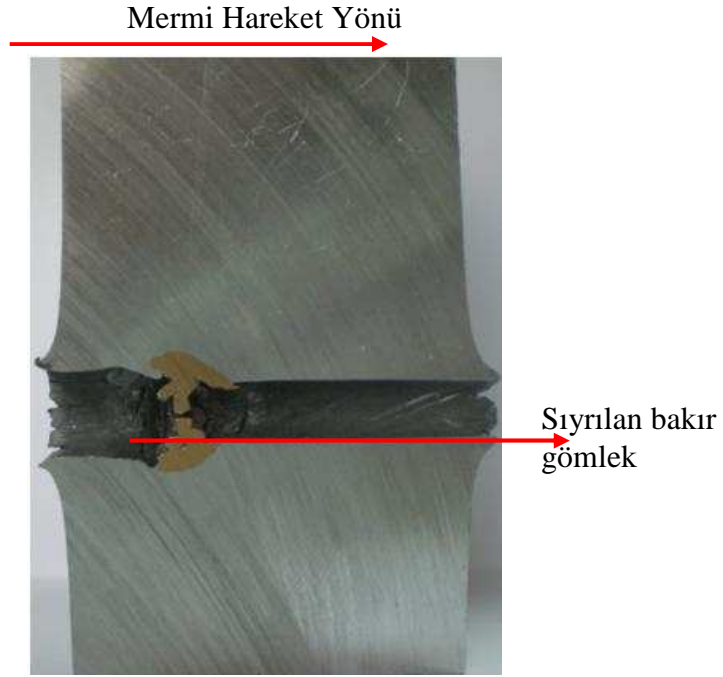


Şekil 5.3.24. 4C grubu numuneler için balistik deneyler sonrası arka yüz görüntülerinin sunulması. En düşük alan yoğunluğundan (a), en yüksek alan yoğunluğuna doğru sıralanmış numuneler. İlk iki alan yoğunluğunda arka yüzde beliren çatlaklar görülmektedir.



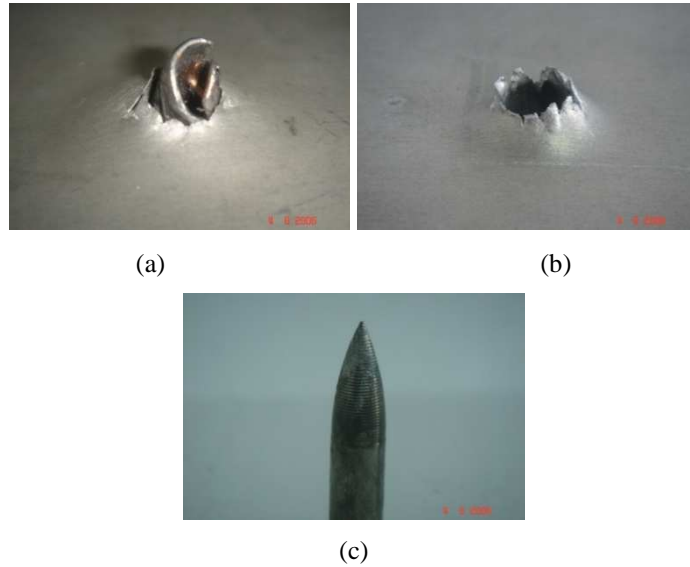
Şekil 5.3.25. 4D numunelerinin balistik deneyler sonrası ön yüz görüntüleri. 1.alan yoğunluğundan (a), 5.alan yoğunluğuna (e) kadar sıralanmış numuneler. 1. Alan yoğunluğunda delinmemiş ancak kırılmış numunenin resmi verilmiştir.

5A numuneleri için; denenen tüm numuneler sünek şekilde delinirken, numune kalınlığı arttıkça merminin çıkış yönünde merminin neden olduğu delik kesiti giderek daralmıştır. Bunun nedeni mermi gömleğinin sıyrılarak delik içerisine sıvanmasıdır. Bu gruptaki numunelerin deneyleri sırasında mermi çekirdeği hasar görmemiştir. Şekil 5.3.26 'da bir numunenin kesiti verilmiş ve sıyrılan bakır gömlek gösterilmiştir.



Şekil 5.3.26. 5. alan yoğunluğundaki 5A numunesinde bakır gömlek sıyrılmasının kesit üzerinde gösterimi. Kırmızı ile işaretlenen bölge sıvanan bakır gömleğe aittir.

5A numunelerinde gözlemlenen sünek delinme Şekil 5.3.27’de örneklenmiştir. Taç yaprağı şeklinde açılan delik çıkışı, sıyrılmış gömlek ve hasar görmeden numuneden çıkan mermi çekirdeği sunulmuştur.



Şekil 5.3.27. (a) ve (b) 'de 5A numunesinde gözlemlenen sünek delinme örneklenmiştir. (c)'de ise bu deneyler sırasında kullanılan ve hasar görmemiş bir mermi çekirdeği sunulmuştur.

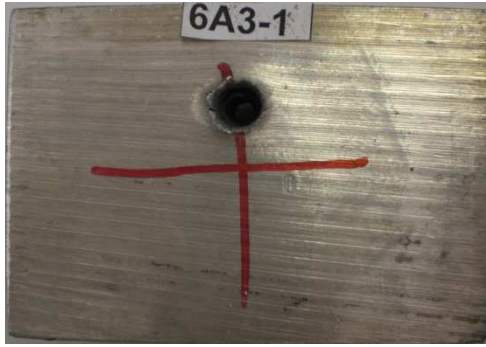
6A numuneleri için; Tüm numuneler sünek şekilde delinmiştir. Bu durum Şekil 5.3.28’de ön yüz görüntüleri Şekil 5.3.29’da da arka yüz görüntüleri verilerek sırasıyla tüm alan yoğunlukları için gösterilmiştir.



(a)



(b)



(c)

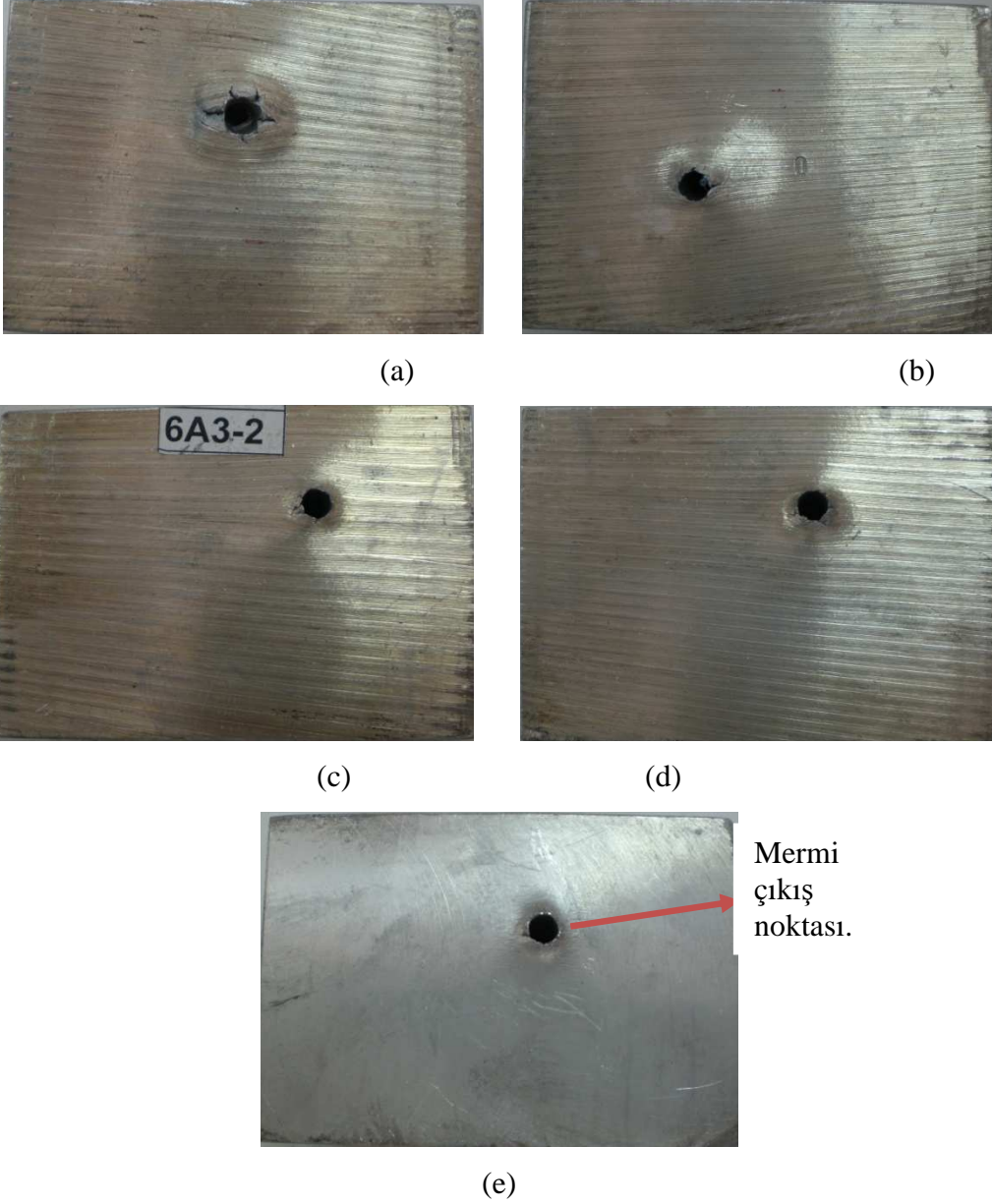


(d)



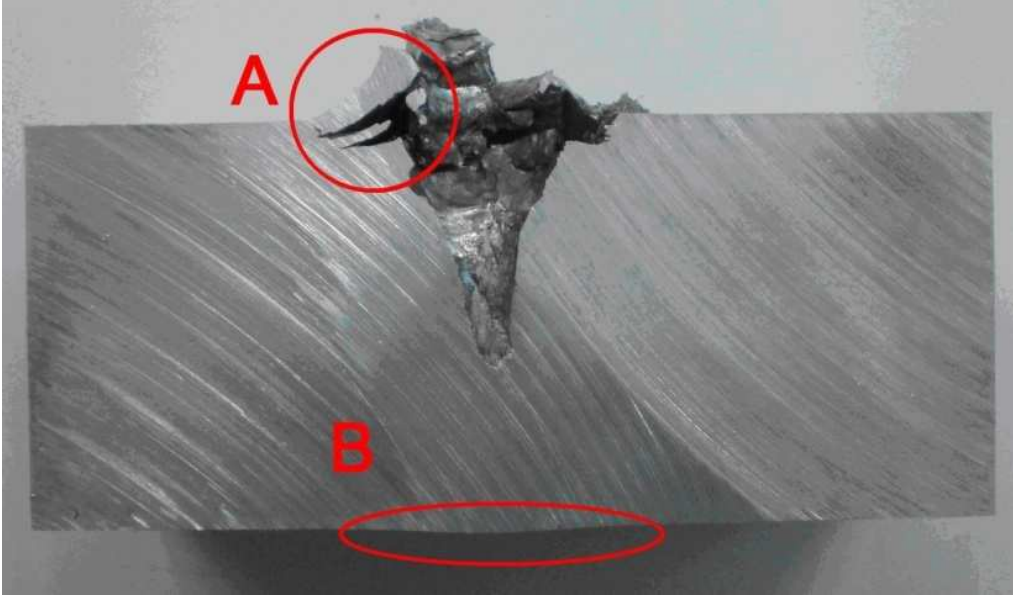
(e)

Şekil 5.3.28. (a)'dan (e)'ye doğru sırasıyla 1. , 2. , 3. , 4. ve 5. alan yoğunluklarına sahip numunelerin balistik testler sonucundaki ön yüz görüntüleri. Tüm numuneler sünek şekilde delinmiştir.



Şekil 5.3.29. (a)'dan (e)'ye doğru sırasıyla 1. , 2. , 3. , 4. ve 5. alan yoğunluklarına sahip numunelerin balistik testler sonucundaki arka yüz görüntüleri. Tüm numuneler sünek şekilde delinmiştir.

6B numuneleri için; en küçük alan yoğunluğuna sahip iki gurubun tüm numuneleri delinirken alüminyum için gevrek sayılabilecek bir davranış sergilemiştir. Mermi çekirdeğinin giriş bölgelerinde hedef levha katman katman ayrılmış ve bu durum Şekil 5.3.30'da verilen kesit görüntüsünde de sunulmuştur. Numune 3. alan yoğunluğundan sonra delinmemiş ancak numunenin arka yüzünde şişme olmuştur. 6B numunelerine ait ön ve arka yüz görüntüleri Şekil 5.3.31 ve Şekil 5.3.32'de sırasıyla sunulmuştur.



Şekil 5.3.30. 6B numunesinin deney sonrası görüntüsünde A detayında mermi giriş bölgesindeki katmanlı ayrılma, B detayında ise delinmeyen numunelerin arka yüzünde gerçekleşen şişme verilmiştir.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

Şekil 5.3.31. 6B numunelerinin balistik deneyler sonrasındaki ön yüz görüntülerinin en düşük alan yoğunluğundan (a), en yüksek alan yoğunluğuna doğru sunulması.

Şekil 5.3.31’de sunulan resimlerde de açıkça görüldüğü gibi zırh ile merminin çarpışma bölgesinde zırh malzemesi öne doğru kat kat ayrılmıştır. 3. alan yoğunluğundan itibaren numuneler delinmemiştir. 3. Alan yoğunluğunda numunenin gövdesine saplanan mermi çekirdeği görülmektedir. Göreceli olarak gevrek sayılabilecek bir davranış sergilenmiştir.



(a)



(b)



(c)



(d)

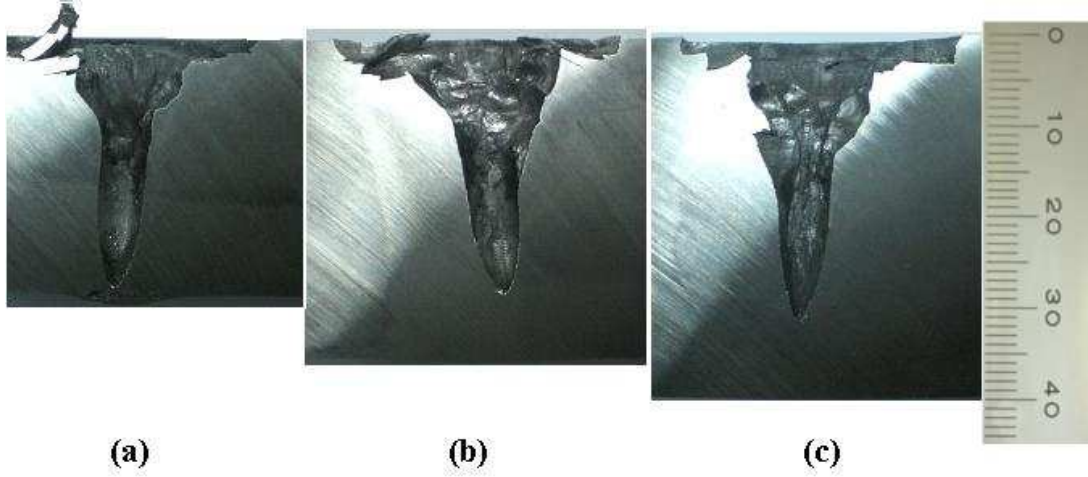


(e)

Şekil 5.3.32. 6B numunelerinin balistik deneyler sonrasındaki arka yüz görüntüleri. En düşük alan yoğunluğundan(a), en yüksek alan yoğunluğuna (e) doğru sıralanmış numuneler. 3. alan

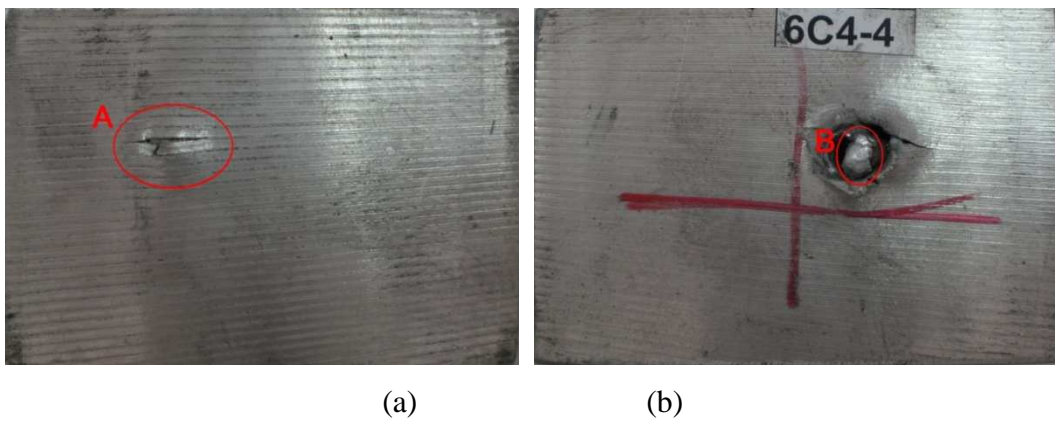
yoğunluğundan itibaren numuneler delinmemiştir. 3. alan yoğunluğunda numunenin arka yüzünde çatlak oluşumu gözlenmiştir.

Üçüncü alan yoğunluğundan itibaren mermi durdurulmuş ve bu alan yoğunluğunun (85kg/m^2) üzerindeki tüm alan yoğunluklarında numune zırha saplanıp kalmıştır. Mermi tüm kalınlıklar için hemen hemen aynı derinliğe kadar saplanmıştır. Bu durum Şekil 5.3.33'de gösterilmiştir.



Şekil 5.3.33. Üçüncü (a), dördüncü (b) ve beşinci (c) alan yoğunluklarında balistik deneylerden sonra kesiti alınan numunelerde merminin batma derinliği. Tüm alan yoğunluklarında yaklaşık olarak aynı derinlikte mermi ilerlemiştir. (Ölçek mm cinsindedir.)

6C numuneleri için; Ancak 4. alan yoğunluğunda mermi durdurulabilirken, bundan daha küçük alan yoğunluklarında gevrek delinme kaydedilmiştir. Delinmeyen numunelerin bir kısmının arka yüzünde çatlaklar tespit edilmiştir. Delinmeyen ve arka yüzünde çatlak belirlenen bir numunenin ön ve arka görünüşleri Şekil 5.3.34'de sunulmuştur. 6C numunelerinin tamamının arka yüz görüntüleri Şekil 5.3.35'de verilmiştir.



Şekil 5.3.34. 6C numuneleri için (a)'da A detayı ile arka yüzünde belirlenen çatlak, (b)'de ise B detayı ile numune içinde kırılan mermi çekirdeği gösterilmiştir.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

Şekil 5.3.35. 6C numunelerinin balistik deneyler sonrasındaki arka yüz görüntülerinin verilmesi. 1. alan yoğunluğundan 5. alan yoğunluğuna doğru sıralanmış numuneler. İlk üç alan yoğunluğunda numuneler delinirken 4. Alan yoğunluğunda numune delinmemiş fakat arka yüzünde çatlak oluşmuştur. 5. alan yoğunluğunda numune arka yüzünde herhangi bir çatlak oluşmamıştır.

Çizelge 5.3’de deneylerde kullanılan tüm malzemeler için balistik başarımlar gösterilmiştir. Buna göre en iyi başarımları ~53 HRC sertlik değerine sahip AISI 4340 çeliği göstermiştir.

Çizelge 5.3. Deneylerde kullanılan Tüm malzeme grupları için balistik başarımın gösterilmesi. 5 atıştan kaçında numunenin delinmediğinin % olarak gösterimi.

Numune Grubu	Alan Yoğunluğu (kg/m ²)				
	55	70	85	100	115
0A	0	0	0	0	0
1A	0	0	0	0	0
1B	0	0	0	0 ^a	0 ^a
1C	0	0a	0a	100	100
1D	0 ^a	0 ^a	0 ^a	0 ^a	80 ^a
2A	0	0	0	60	100
2B	0	100 ^b	100 ^b	100 _b	100
2C	0	0	100	100	100
2D	0	20	100	100	100
3A	0	0	0	100 ^b	100 ^b
3B	0	0	0	0	0
3C	0	0	0	0	20
3D	0	0	0	0	60
4A	100	100	100	100	100
4B	40	100	100	100	100
4C	40 ^a /60 ^b	80/20 ^b	100	100	100
4D	0a	40 ^a /60 ^b	80/20 ^b	100	100
5A	0	0	0	0	0
6A	0	0	0	0	0
6B	0	0	100	100	100
6C	0	0	0	100 ^b	100 ^b

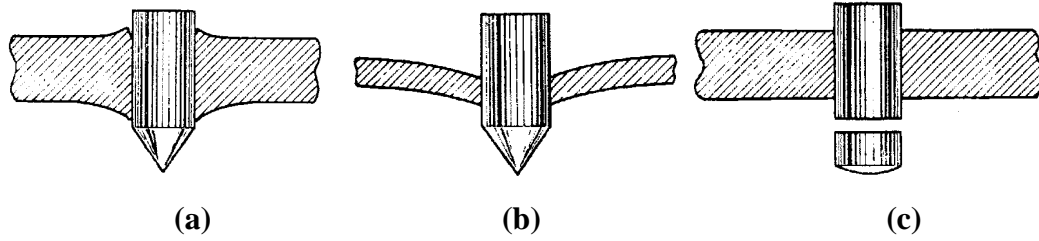
^aNumune delinmemiştir ancak birçok parçaya ayrılmıştır.

^bNumune başarılıdır ancak arka yüzünde bazı çatlaklar oluşmuştur.

Sertliğin artması gevrekliği de beraberinde getirdiğinden numuneler delinmese de kırılmış ve balistik olarak başarısız sayılmıştır. Bu durum tokluğun de en az sertlik kadar etkili olduğunun en belirgin göstergesidir.

5.4. Hasar Mekanizmaları

Metal zırhlarda ve metal destek katmana sahip katmanlı zırhlarda görülen hasar mekanizmaları birbirinden farklılıklar gösterir. Bu bölümde öncelikle metal zırhlarda görülen hasar mekanizmaları ele alınacaktır. Seramik katmanlı metal destekli zırhlarda görülen hasar mekanizmaları Bölüm 3.2.2.1’de açıklanmıştır. Metallerde daha önceki yıllarda yapılan çalışmalarda [7] 3 tip hasar şekli tespit edilmiştir. Bunlar sünek delinme, çukur tipi delinme ve zımba etkisiyle delinme olarak sıralanabilir. Bu konuda yapılan çalışmalar arasından Woodward’ın [7] yaptığı çalışma kaynak alınmaktadır. Woodward’a göre hasar mekanizmaları Şekil 5.4.1’de gösterildiği gibidir.

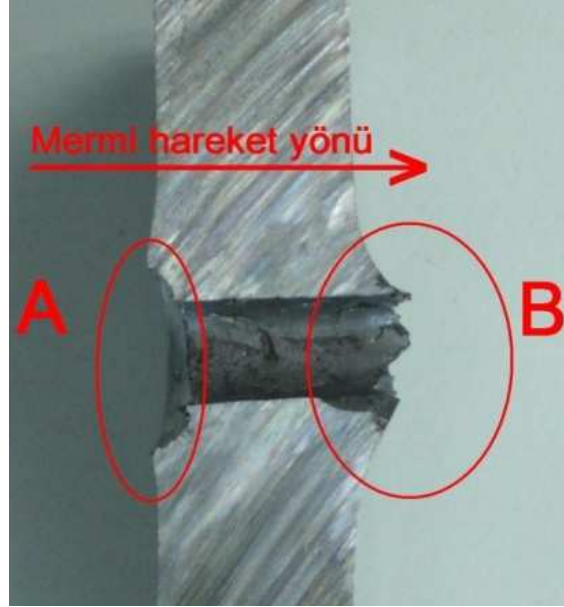


Şekil 5.4.1. Metaller için hasar mekanizması çeşitleri [7]. (a) sünek delinme örneği, (b) çukur tipi delinme ve (c) zımba etkisiyle delinme.

Yapılan bu çalışmada [7], çok gevrek malzemeler göz ardı edilmiştir. Oysa çok gevrek malzemelerin balistik deneylerinde bu modeldeki gibi bir delik oluşumu değil numunenin kırılarak birçok parçaya ayrılması söz konusudur. Numune kırılır ve kalınlığına bağlı olarak belli sayıda parçaya ayrılır. Yapılan bu çalışmada bu modele uygun olarak delinen numuneler olmuştur. Bunları oluşan sünek delinme örnekleri ile açıklamak gerekirse;

Yapılan deneylerde sünek malzemelerin delinmesi sırasında mermi gömleğinin çekirdekten sıyrılması sonucu çarpışma yüzeyinde veya biraz daha iç kısımlarda çukur oluştuğu gözlemlenmiştir. Örneğin sünek çelik numunelerden 1A numunelerinde gömlek mermi ile

hedefin çarpıştığı yüzeyde birbirinden ayrılmış ve çarpışma bölgesinde Şekil 5.4.2'de A detayı ile ifade edilen çukurun oluşmasına neden olmuştur. Mermi sünek numunelerden çıkarken ise belli bir miktar malzemeyi de kendisi ile birlikte dışarı doğru sürüklemiştir. Bu durum ise Şekil 5.4.2'de B detayı ile verilmiştir.



Şekil 5.4.2. Sünek delinen 1A numunesinde mermi giriş bölgesinde gömleğin sıyrılması sonucu oluşan çukurun (A detayı) ve çıkış yönünde akışa zorlanan malzemenin (B detayı) gösterilmesi.

Modelde ikinci hasar tipi olarak gösterilen çukur tipi delinme şekline ise tek metal katman olan zırhlarda değil katmanlı kompozit zırhlarda destek katman olan çelik levhanın delinmesi sırasında rastlanmıştır. Bunun nedeni sabit alan yoğunluğunda deneyleri yapmak için seramik katmandan gelen alan yoğunluğu çıkarıldığında daha düşük alan yoğunluklu bir destek katman kullanılmasıdır. Diğer bir ifade ile seramik katman çıkarıldığında destek katmanın kalınlığının düşmesidir. Örneğin en düşük alan yoğunluğu olan 55 kg/m^2 'de destek çelik katmanın kalınlığı 4 mm olarak belirlenmiştir. Bu nedenle modelde ince metal levhalar için gösterilen çukur tipi delinme gerçekleşmiştir. Bu durum Şekil 5.4.3'de 4B1 grubu numuneleri için gösterilmiştir. Mermi açtığı delik oldukça küçük görünse de oluşan çukur oldukça derindir.



(a)



(b)

Şekil 5.4.3. 4B1 grubu numunelerde görülen çukur tipi delik oluşumu hasar mekanizmasının sunulması. Seramik katmanın kırılması ile birlikte ince sayılabilecek destek katmanının mermi tarafından delinmesi çukur oluşturacak şekilde gerçekleşmiştir.

Deney yapılan numuneler içinde zımba tipi delik oluşumu da gözlenmiştir. Kırılacak kadar çok gevrek olmayan ancak sünek delinme şeklinde de hasara uğramayan bu numuneler genel olarak 50 HRC sertlikteki çelik numuneler olmuştur. Bunlara örnek olarak düşük alan yoğunluklarında 2B numuneleri gösterilebilir. Mermi çekirdeği ile gömlek birbirinden daha erken ayrılmış ve hedefe yalnızca çekirdeğin tahribatı söz konusu olurken, çekirdek önüne malzeme katarak ilerlememiş ve malzemeyi doğrudan delip geçmiştir. Bu durumda merminin çıkışı yönünde Şekil 5.4.4’de de görüldüğü gibi bir tümsek oluşmamıştır. Bir başka çarpıcı nokta ise kalın ve sünek malzemelerin yivli mermilerle denenmesinde bilinenin aksine mermilerin, çıkış bölgelerinde daha büyük bir kesitten çıkmadığıdır. Bu durum çarpışma sırasında gömleğin çekirdeği terk etmesi ile açıklanabilir. Böylece sadece çekirdek yola devam etmiş ve Şekil 5.4.5’de görüldüğü gibi giderek daralan bir kesit elde edilmiştir. Buna ek olarak mermi gömleğinin sıyrılmasının önemli sonuçlarından biri de mermi giriş yönünde oluşan şişmedir. Sıyrılma sonucu sönmülmeyen şok dalgaları hedefin, merminin giriş

yönünde de şişmesine neden olmuştur. Bu durum genel olarak kalın alüminyum numunelerde gözlemlenmiş ve yine Şekil 5.4.5’de sergilenmiştir.



Şekil 5.4.4. Gevrek delinen 2B numunesinde mermi giriş bölgesinde sıyrılmanın etkisinin olmadığı ve çıkış yönünde genişlemenin gösterilmesi.



Şekil 5.4.5. Sünek alüminyum numunesi 6A’da mermi hareket yönünde bakır gömlek sıyrılması sonucu kesit daralması ve yine aynı nedenden mermi giriş bölgesindeki şişmenin gösterimi.

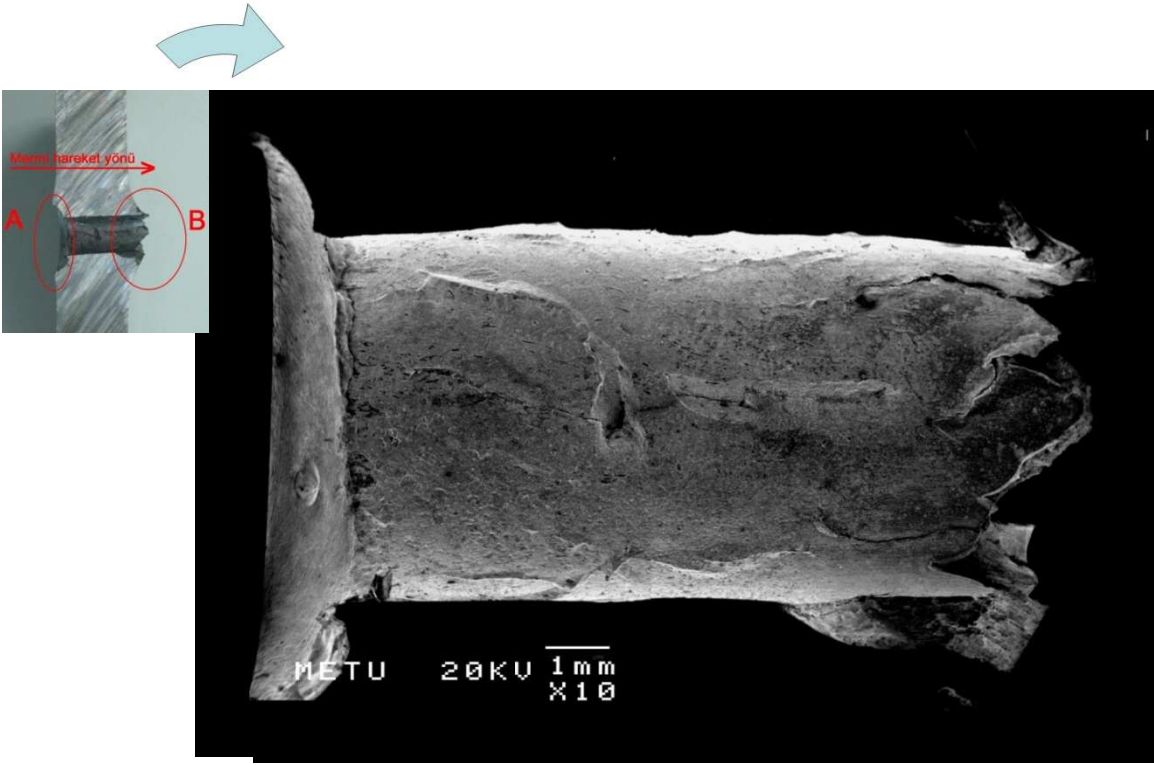
Woodward’ın [7] modelinde olmayan fakat deneyler sonrası karşılaşılan bir diğer hasar mekanizması şekli de çok gevrek numunelerin ani şekilde parçalanmalarıdır. Bu duruma en güzel örnek yüksek sertlik değerlerine sahip olan çelik numunelerdir. Şekil 5.4.6’da bu duruma örnek gösterilmiştir.



Şekil 5.4.6. 3C grubu numunelerde ani ve tahmin edilemez kırılma şeklinin gösterimi. Diğer modellerde gösterilenin dışında numune çok gevrek olduğu durumlarda mermi geçmesine izin vermese de kendisi parçalanarak dağılmaktadır.

5.5. Deney Sonrası Oluşan Deliklerin Mikro İncelemesi

Deneylerden sonra yapılan makro incelemelerin ardından mikroskop altında kırık yüzeyler, delinme şekilleri, şok dalgalarının etkisi, çatlak oluşumları ve ilerlemelerinin ne yönde olduğu incelenmiştir. Delinen numuneler için delik kesitleri alınarak bu kesit boyunca delinme yüzeylerinin, mermi giriş ve çıkış bölgelerinin ve iç çatlakların gösterilmesi için taramalı elektron mikroskopu altında incelemeler yapılmıştır. Şekil 5.5.1’de sünek ve gevrek delinen iki numunenin delik kesitlerinin taramalı elektron mikroskopu görüntüleri verilmiştir. Sünek delinen numunenin orta bölgesinde bulunan çatlağın mermi hareket yönünde ilerlemiş olması göze çarpmaktadır. Şekil 5.5.2’de çatlak bölgesinin daha yakından görünüşü verilmiştir. Sünek malzemelerde mermi giriş bölgesinde çukur oluşurken, mermi çıkış bölgesinde ise taç yaprağı şeklinde bir açılma gerçekleşmiştir. Çeliklerde yüksek sertlikteki numuneler delinmemesine rağmen kırılmışlardır. Bu numunelerin kırık yüzeyleri incelenmiştir. Kırılmış numunelerde merminin çarptığı bölgeyi içine alan kesitler hazırlanarak bu bölgeler taramalı elektron mikroskopu altında incelenmiştir. Şekil 5.5.3’de iki parçaya ayrılan 1C4–2 numunesinin ve Şekil 5.5.4’de ise 1C2–3 numunesinin hangi bölgesinden kesit alındığı A harfi ile gösterilmiştir. Mikroskobik incelemeler sırasında numunenin EDS analizleri alınmıştır.

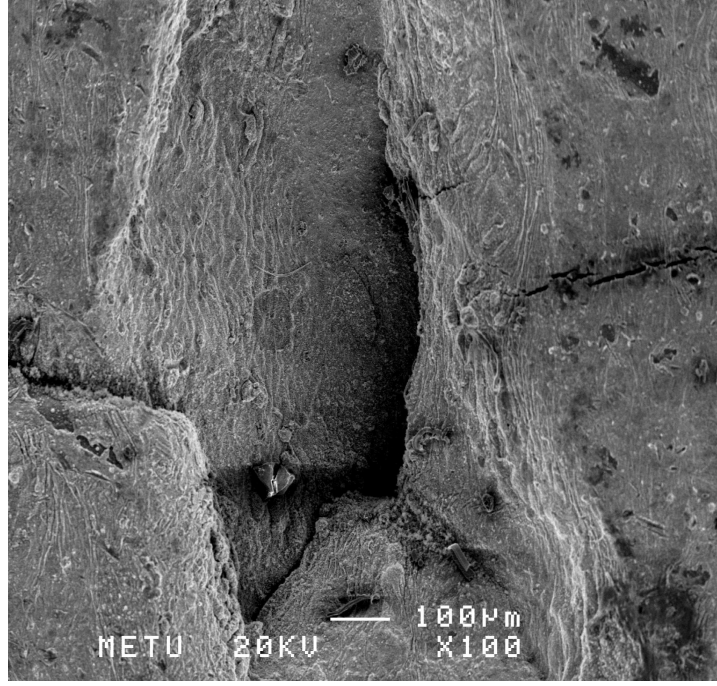


(a) Sünek delinme.

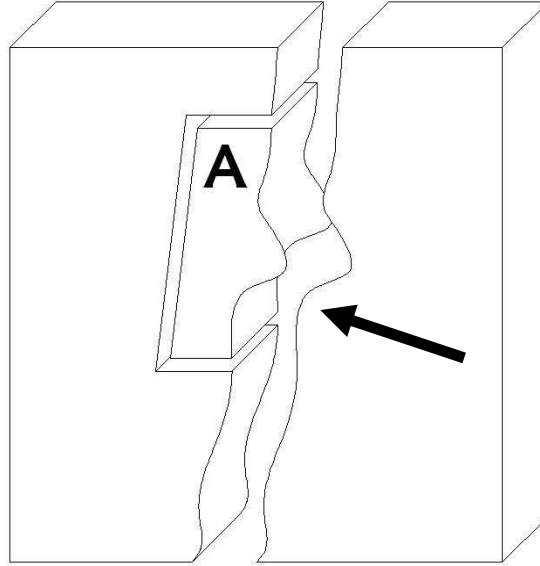


(b) Gevrek delinme.

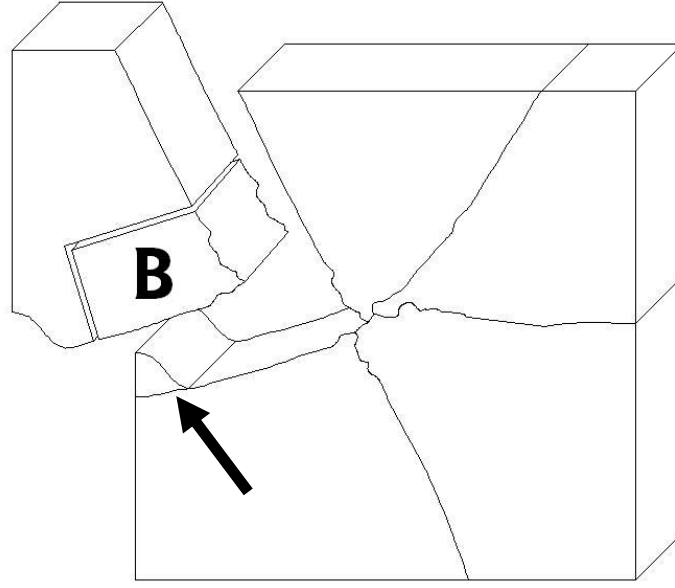
Şekil 5.5.1. Sünek ve gevrek delinen numune örneklerinin SEM görüntüleri. (a) Sünek delinen numunede mermi giriş bölgesinde genişleme ve çıkış bölgesinde taç yaprakları gibi açılmış bir yapı gözlemlenmektedir. (b) Gevrek delinen numunede ise mermi hareket yönüne paralel malzeme sürüklenmesi ve daha parlak bir yüzey görülmektedir.



Şekil 5.5.2. Sünek delinmede oluşan çatlak bölgesinin yüksek büyütmelerdeki görünüşü.
(X100) Çatlak mermi hareket yönünde ilerlemiş ve hareket yönünde dik kısa çatlak ilerlemeleri de gözlemlenmektedir.



Şekil 5.5.3. 1C4-2 numunesinin balistik deney sonrası görüntüsünün modeli. A harfi ile gösterilen parçanın kesilmemiş kırık yüzeyi taramalı elektron mikroskopunda incelenmiştir.

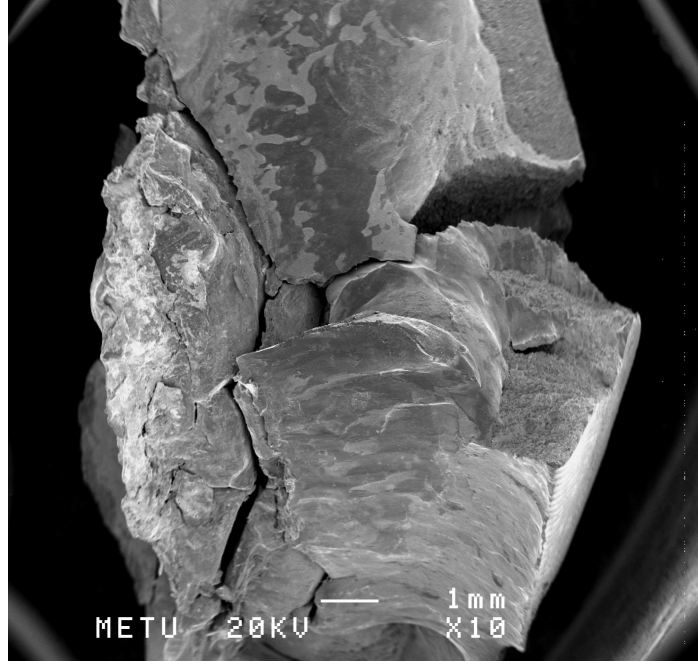


Şekil 5.5.4. 1C2–3 numunesinin balistik deney sonrası görüntüsünün modeli. B harfi ile gösterilen parçanın kesilmemiş kırık yüzeyi taramalı elektron mikroskopunda incelenmiştir.

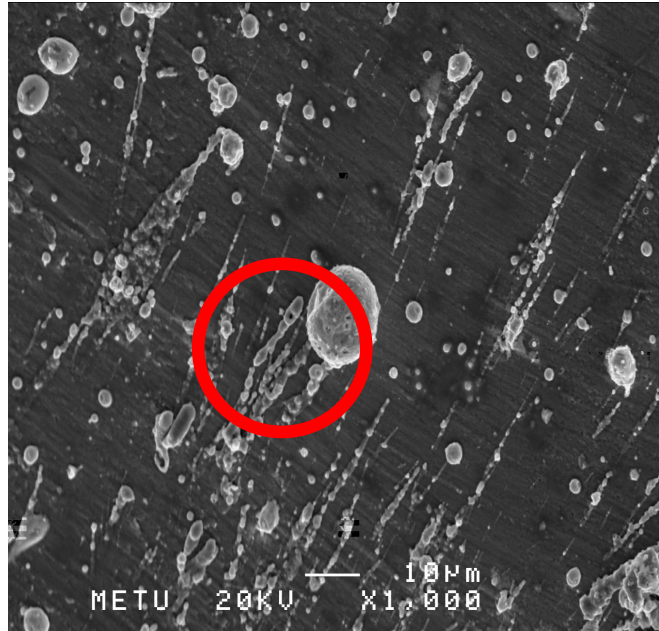
Numunelerin incelemeleri Şekil 5.5.3 ve 5.5.4’de oklarla gösterilen yönlerden yapılmıştır. A parçasında ait bölgenin taramalı elektron mikroskopu görüntüsü Şekil 5.5.5’de verilmiştir.

A parçasında mermi çekirdeği ile numunenin temas yüzeyine çok yakın bölgelerde yüksek büyütme yapılan incelemelerde Şekil 5.5.6’daki görüntü elde edilmiştir. Şekilde küresel olarak görünen ve ayrı bir parça gibi duran parçacık üzerinden EDS analizi alınmıştır. Şekil 5.5.7’de EDS analizinin sonucu verilmiştir. Yapılan analiz parçacığın kurşun (Pb) olduğunu göstermiştir. Benzer şekilde çarpışma sırasında birçok bölgeye kurşun parçacıklarının yapıştığı gözlemlenmiştir.

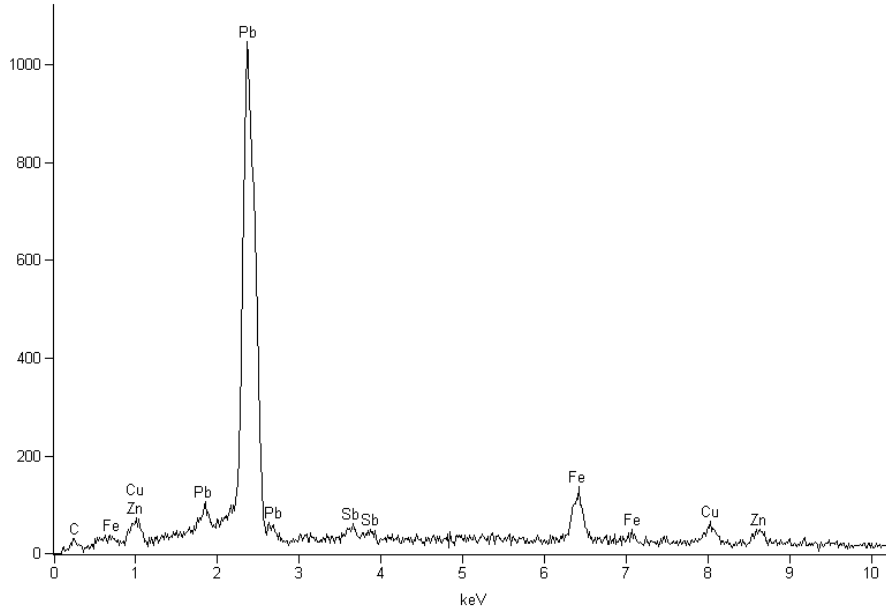
Mermi hareket yönü



Şekil 5.5.5. A parçasında merminin çarpıp yapıştığı bölgenin gösterimi. Sol tarafta parçaya sonradan yapışmış gibi duran bölge mermi çekirdeğidir. Numunenin arka yüzünde oluşan derin çatlaklar görülmektedir.

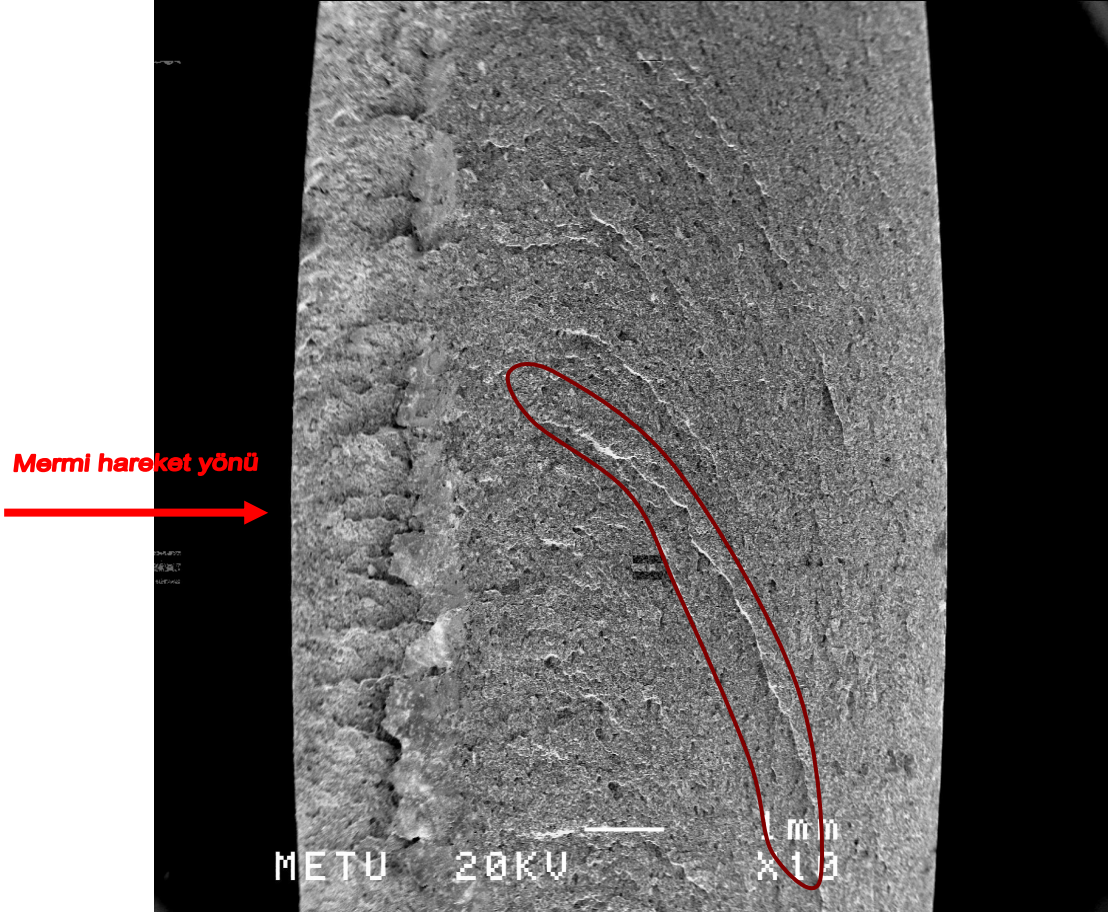


Şekil 5.5.6. Mermi ile hedefin çarpışma yüzeyine yakın bir bölgede 1000 büyütmede elde edilen görüntü. Daire içine alınan parçacığın kurşun olduğu belirlenmiştir.



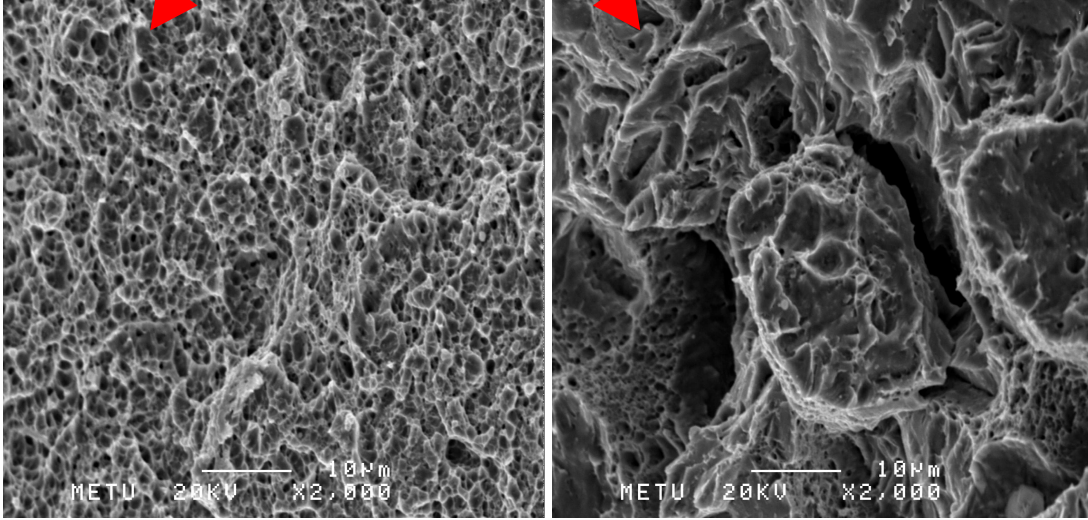
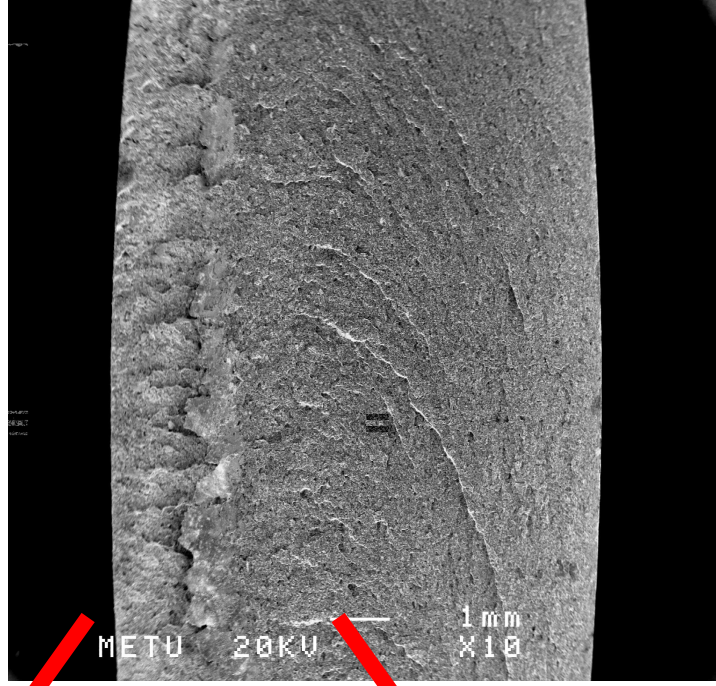
Şekil 5.5.7. Küresel parçacık üzerinden alınan EDS analizi sonucu.

B parçası üzerinde yapılan incelemelerde şok dalgalarının görüntüleri elde edilmiştir. Şekil 5.5.8’de şok dalgalarının hareket yönlerinin açıkça görülebildiği taramalı elektron mikroskopu görüntüsü verilmiştir. Şekilde de görüldüğü gibi şok dalgaları çarpışma yüzeyinden değil arka yüzden öne doğru tepki olarak aktarılmaktadır ve çatlak oluşumu çarpışma yüzeyinde değil arka yüzde başlayıp, çatlaklar arkadan öne doğru ilerlemektedir. Bunun nedeni mermi ile hedef çarpışma yüzeyinde basma dalgaları oluşurken numunenin arka yüzünde çekme dalgaları oluşmasıdır. Bilindiği gibi çekme dalgaları çatlak oluşumunu başlatan ve çatlak ilerlemesini hızlandıran en önemli etmendir.



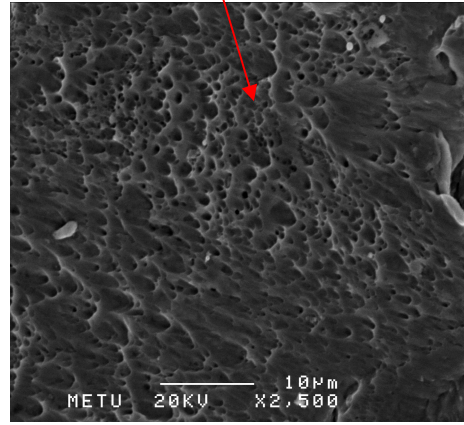
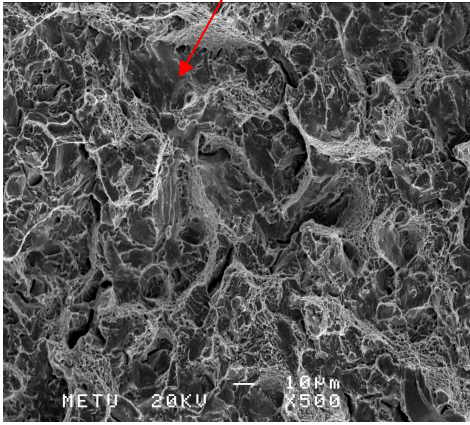
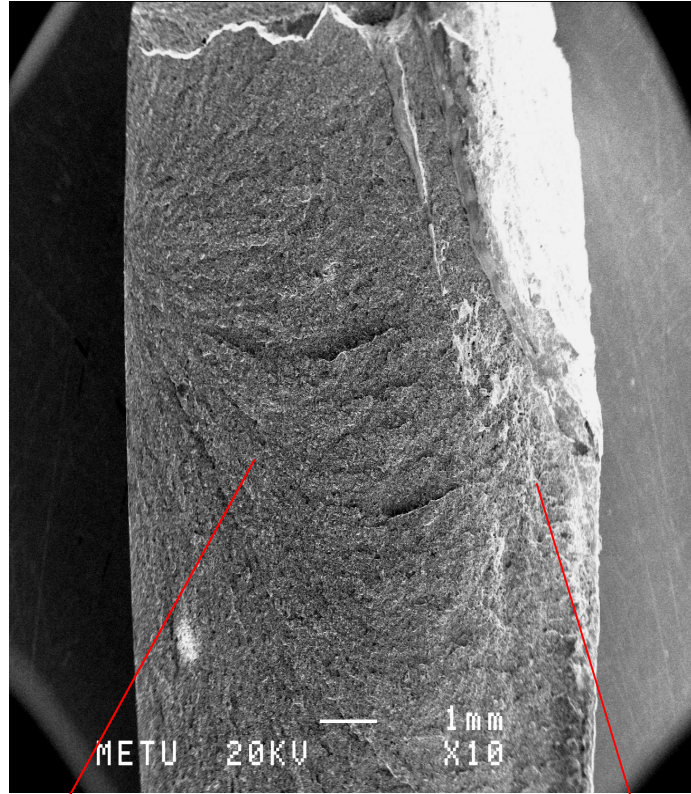
Şekil 5.5.8. B parçasında şok dalgalarının gösterilmesi. Kırmızı ile işaretlenen bölge şok dalgalarının hareketlerini göstermektedir. Mermi şeklindeki görüntünün sol alt köşesinden numuneye çarpmıştır.

Şekil 5.5.8’de görüldüğü gibi numune ile merminin çarpışma bölgesinden itibaren yaklaşık 1 mm derinlikte farklı bir yapı gözlemlenirken daha derin bölgede daha farklı bir yapı gözlemlenmektedir. Bu durumu incelemek için iki bölgede de daha yüksek büyütmeyle gidilerek yapıların yeni fotoğrafları çekilmiştir. Şekil 5.5.9’da 1C2 grubu bu numunedeki iki bölgenin de yüksek büyütmede taramalı elektron mikroskobu görüntüleri verilmiştir. Benzer şekilde kırılan 2C ve 3C grubu numunelerin kırık yüzey ve kırık yüzey detay görüntüleri sırasıyla Şekil 5.5.10 ve 11’de sunulmuştur.

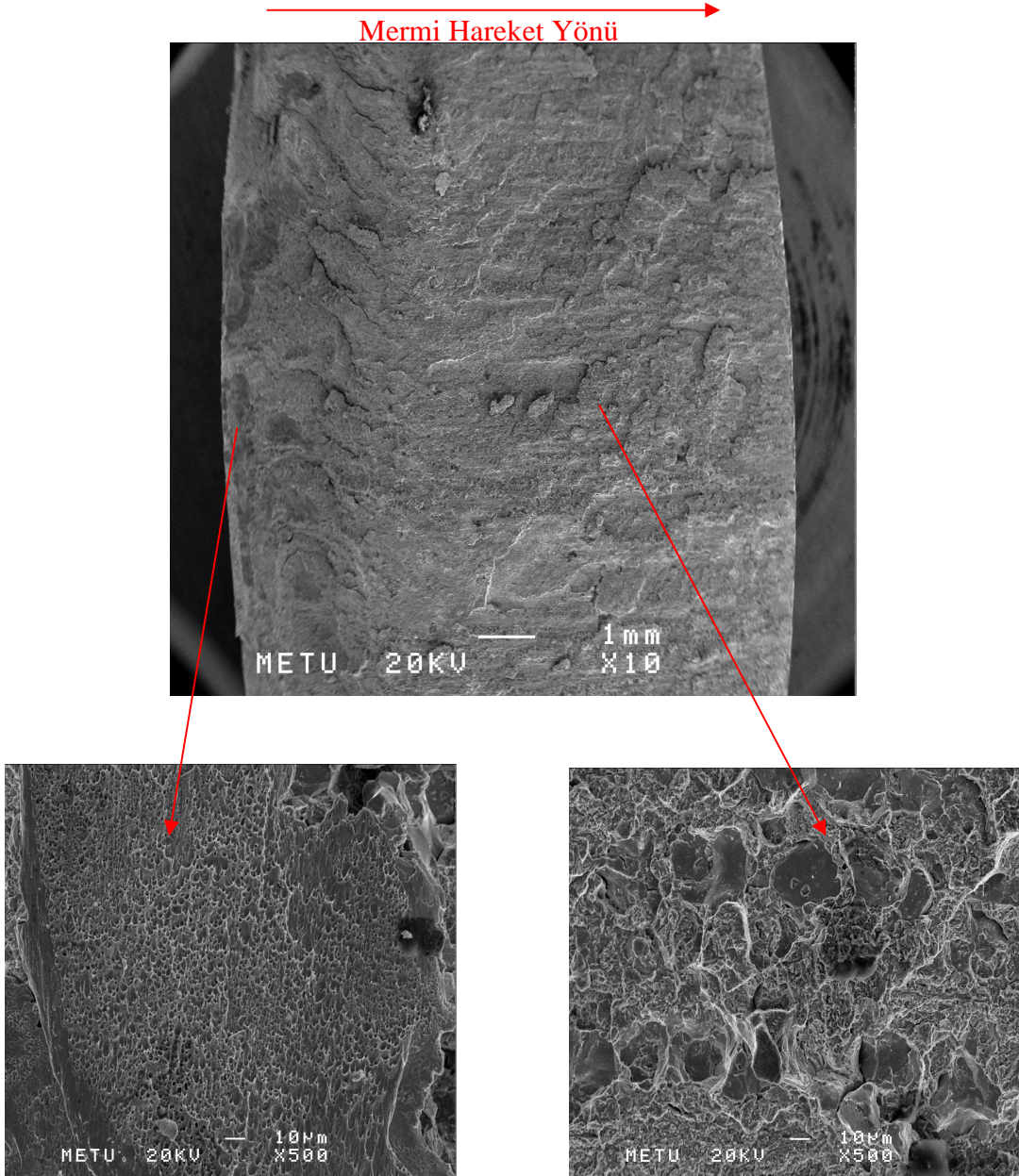


Şekil 5.5.9. 1C2 grubu numunede B parçasının kırık yüzeyinde bulunan mermi ile hedef çarpışma yüzeyine yakın bölgedeki kırık yüzey görüntüsü ile çarpışma bölgesinden uzak bölgedeki kırık yüzeyin SEM görüntüsü. Her iki görüntüde de çukurlu bir yapı mevcutken çukurların büyüklükleri çok büyük farklılıklar göstermektedir.

←
Mermi hareket yönü



Şekil 5.5.10. 2C grubu numune de kırık yüzeyinde bulunan mermi ile hedef çarpışma yüzeyine yakın bölgedeki kırık yüzey görüntüsü ile çarpışma bölgesinden uzak bölgedeki kırık yüzeyin SEM görüntüsü.



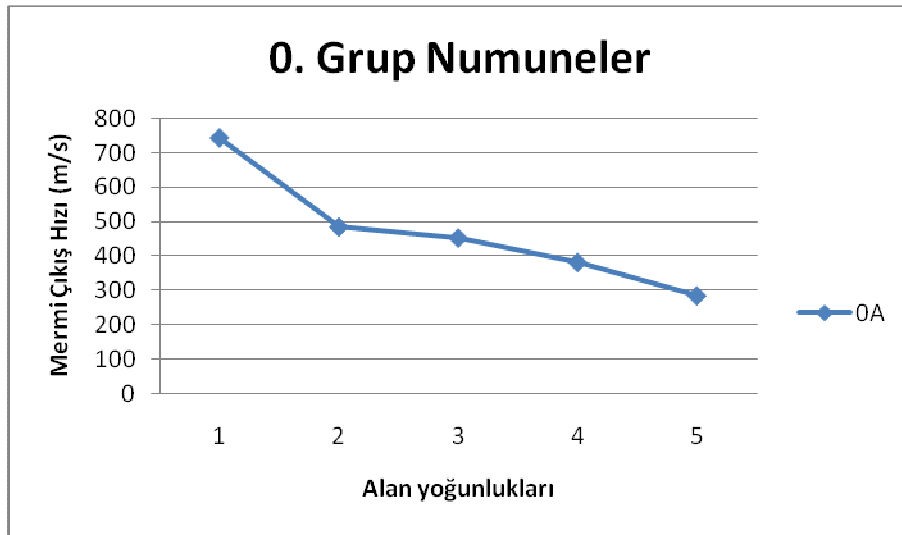
Şekil 5.5.11. 3C grubu numune de kırık yüzeyinde bulunan mermi ile hedef çarpışma yüzeyine yakın bölgedeki kırık yüzey görüntüsü ile çarpışma bölgesinden uzak bölgedeki kırık yüzeyin SEM görüntüsü.

Denenen tüm çelik numuneler için çarpışma yüzeyinde ve çarpışma yüzeyine yakın 1 mm'lik bölümde ince çukurlara sahip bir yapı elde edilirken daha derinlere gidildiğine bu kez daha iri çukurların olduğu bir yapıya rastlanmaktadır. Tüm şekillerde ortak olarak görünen bir diğer nokta da yansıyan çekme dalgalarından kaynaklanan kayma bantlarının yüzeye paralel olarak yayıldığıdır. Bu kayma bantları çevrimsel bir yük geldiğinin göstergesidir. Kırılan bu numunelerde çarpışma bölgesinde gevrek kırılmanın doğal bir sonucu olarak kabul

edilebilecek çok ince çukurlu yapı gözlenirken iç kısımlarda sünek kabul edilebilecek kırılmalarda daha çok gözlenen iri gözenekli yapı görülmektedir.

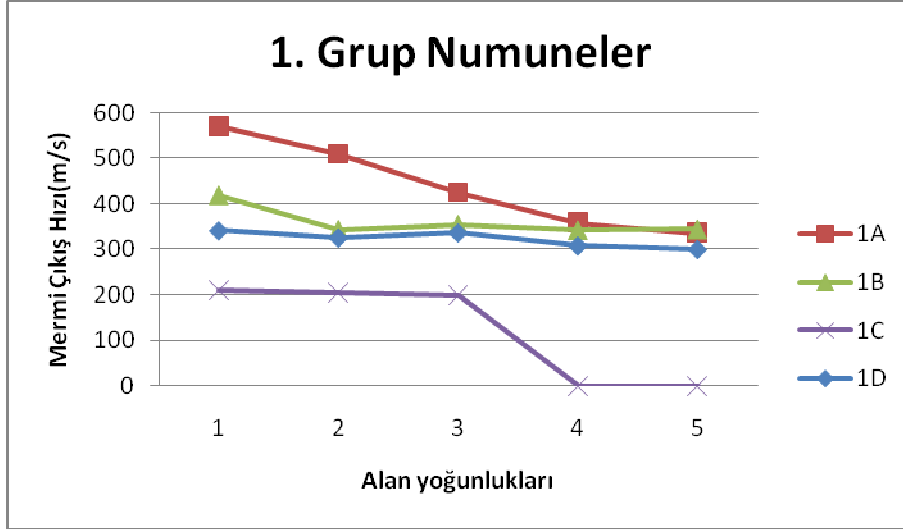
5.6. Mermi Çıkış Hızları

Mermilerin numunelere çarptıktan sonra eğer delebilmişlerse çıkış hızları ölçülebilmiştir. Mermi çıkış hızlarının alan yoğunluklarına göre nasıl değiştiği grafik halinde sunulmuştur. Şekil 5.6.1’de 0 grubu numuneler için alan yoğunluğuna göre mermi çıkış hızları verilmiştir.



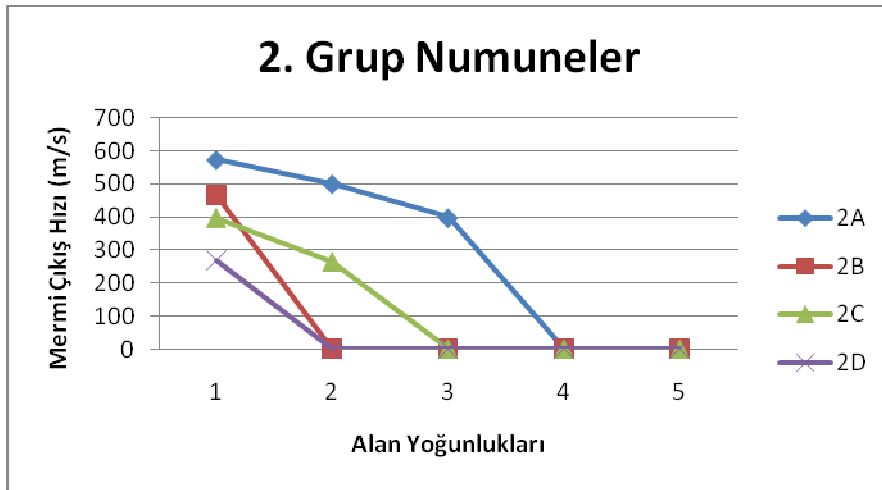
Şekil 5.6.1. 0 grubu numuneler için alan yoğunluğuna karşılık gelen mermi çıkış hızları sunulmuştur. Alan yoğunluğunun artması mermi çıkış hızını düşürmüştür ancak yine de tüm numuneler delinmiştir.

1 Grubu numuneler için mermi çıkış hızının hemen alan yoğunluğuna göre hem de ısıl işleme göre nasıl etkilendiği Şekil 5.6.2’de sunulmuştur. Numunenin sertliği arttıkça mermi çıkış hızı düşmüştür. Ancak 1C numunelerinde 4. ve 5. alan yoğunluklarında numuneler mermiyi durdurmuştur. ~55 HRC sertlik değerine sahip 1C numuneleri 60 HRC sertlikteki 1D numunelerinden daha düşük mermi çıkış hızlarına neden olmuştur. Bu durum göreceli olarak tokluğunun daha yüksek olmasına bağlanabilir.



Şekil 5.6.2. 1 grubu numuneler için elde edilen mermi çıkış hızlarının numunenin sertliğine ve alan yoğunluğuna bağlı olarak nasıl değiştiğinin sunulması. Genel olarak artan sertlik ve alan yoğunluğu mermi çıkış hızını düşürmüştür.

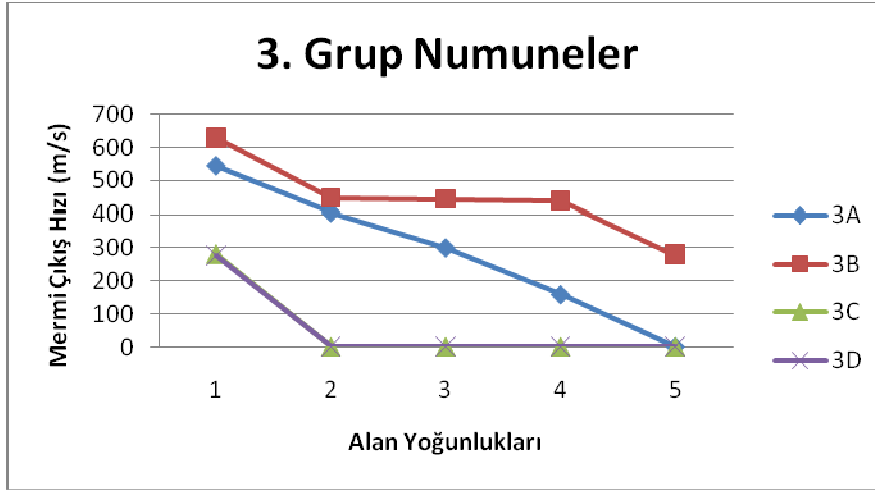
2 Grubu numuneler balistik başarımı en yüksek olan numune grubu olarak dikkat çekmektedir. Bu gruptaki numuneler ~53HRC sertlikte (2B) ikinci alan yoğunluğundan itibaren mermiyi durdurarak tam balistik koruma sağlamıştır. Artan alan yoğunluğu mermi çıkış hızını düşürmüştür. (Şekil 5.6.3)



Şekil 5.6.3. 2 Grubu numunelerde balistik deneylerde mermi çıkış hızlarının sertlik ve alan yoğunluğuna bağlı olarak değişiminin gösterilmesi.

Şekil 5.6.4'de 3 grubu numunelerin mermi çıkış hızları sergilenmiştir. C ve D grubu numuneler 2. alan yoğunluğundan itibaren delinmemiştir ancak bu balistik olarak başarılı oldukları anlamına gelmez. Bu

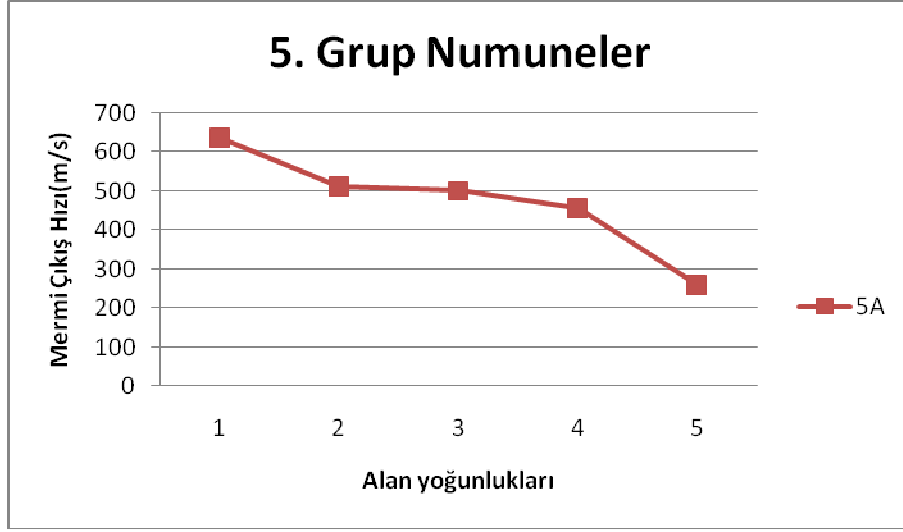
gruplardaki numuneler merminin geçişine izin vermemiştir ancak parçalanmışlardır. Çoklu atışa uygun değildir ve tam balistik koruma sağladıkları söylenemez. A ve B grubu numuneleri için ise artan alan yoğunluğu mermi çıkış hızını düşürse de 1 ve 2 grubu numunelerin aksine A ısıl işlemi uygulanan zırh numuneleri B ısıl işlemi uygulanan zırh malzemelerinden daha yüksek mermi çıkış hızları vermiştir.



Şekil 5.6.4. 3 Grubu numunelerin mermi çıkış hızlarına zırh sertliğinin ve alan yoğunluğunun etkisi. Numuneler C ve D ısıl işlemlerinde delinmemesine rağmen kırılarak başarısız olmuştur.

4 Grubu numunelerde hiçbir numunede çıkış hızı ölçülemedi. Bazı numunelerin delinmesine rağmen ön seramik katman kırılana kadar hem mermi çekirdeğini aşındırmış hem de mermi hareket yönünü değiştirmiştir. Bunun bir sonucu olarak mermiler duyarga sistemleri içinden geçememiş ve hızları ölçülemedi. Genel olarak incelendiğinde ise numunelerde oluşan çukur tipi delinme yüksek enerji soğuran bir hasar mekanizmasıdır. Bu durumda merminin kinetik enerjisinin büyük kısmı destek çelik katmanın çukur şeklini alması için harcanır. Bu bakımdan çıkış hızının göreceli olarak düşük olabileceği söylenebilir.

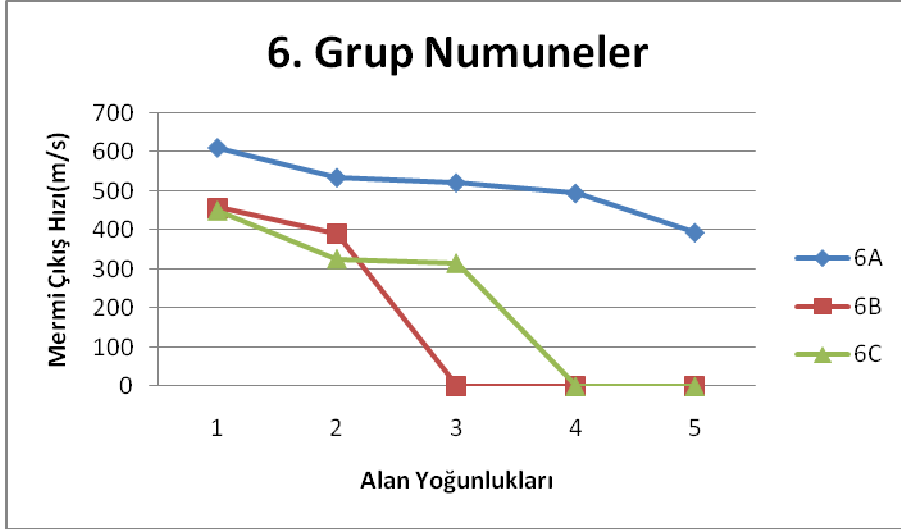
5 Grubu numunelerde mermi çıkış hızının alan yoğunluğuna etkisi Şekil 5.6.5’de sunulmuştur. Buna göre bu gruptaki numunelerin tamamı delinmiş ve artan alan yoğunluğu mermi çıkış hızını düşürmüştür.



Şekil 5.6.5. 5 grubu zırh malzemelerinin alan yoğunluğuna bağlı olarak balistik deneyler sırasında delinmeleri sonucu mermi çıkış hızlarının nasıl değiştiğinin gösterimi. Artan alan yoğunluğu ile mermi çıkış hızı düşmüştür.

Esas olarak 5 Grubu numunelerdeki artan alan yoğunluğu mermi çıkış hızını 5. alan yoğunluğuna kadar çok fazla etkilememiştir. Oysa diğer numunelerde alan yoğunluğundaki artış mutlak olarak mermi çıkış hızını düşürmüştür.

6 Grubu numunelerde mermi çıkış hızına yaşlandırma ve aşırı yaşlandırmanın tavlama göre ve alan yoğunluğunun etkisi Şekil 5.6.6'da gösterilmiştir. Tavlanmış numunelerin tamamı delinirken artan alan yoğunluğu numuneler delindikten sonra mermi çıkış hızını düşürmüştür. Öte yandan yaşlandırma ve aşırı yaşlandırma yapılan numunelerde mermi durdurulabilmiştir. Yaşlandırılmış olan 6B numunelerinde, 2. alan yoğunluğundan sonra ($>85\text{kg/m}^2$) tam balistik koruma sağlanmıştır. Alan yoğunluğundaki artış ile ilk iki alan yoğunluğunda mermi çıkış hızı önemli ölçüde değişmemiştir. Aşırı yaşlandırılmış numunelerde ise 3. Alan yoğunluğundan sonra tam balistik koruma sağlanmıştır. Bu grupta bulunan numuneler için delinen numuneler göz önünde bulundurulduğunda artan alan yoğunluğu mermi çıkış hızını azaltmıştır.

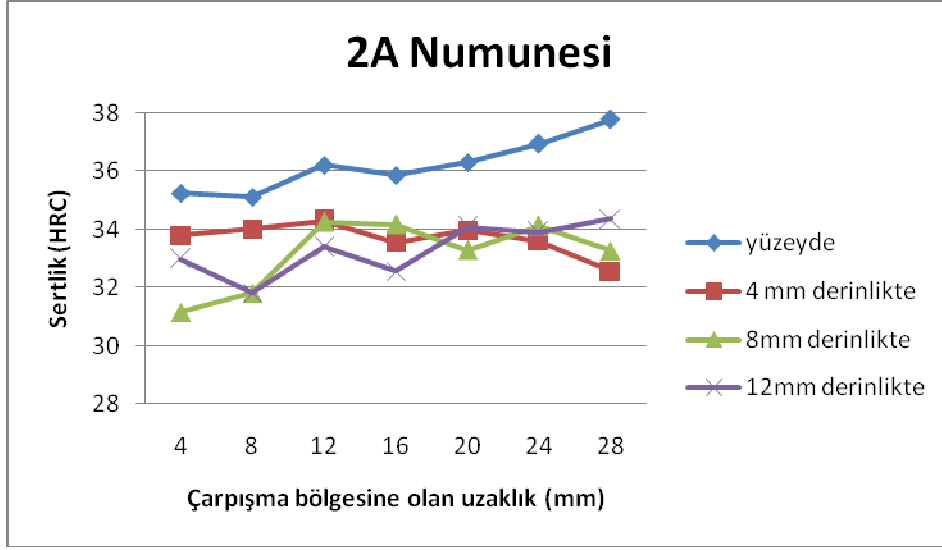


Şekil 5.6.6. 6 Grubu numunelerde mermi çıkış hızına alan yoğunluğu ve ısıl işlemin etkisi.

Tavlanan numuneler (6A) delinirken, yaşlandırılan (6B) numuneler en iyi balistik başarıyı sergilemiştir. Aşırı yaşlandırmanın (6C) yaşlandırmaya göre bir fayda sağlamadığı gibi aksine başarıyı düşürmüştür.

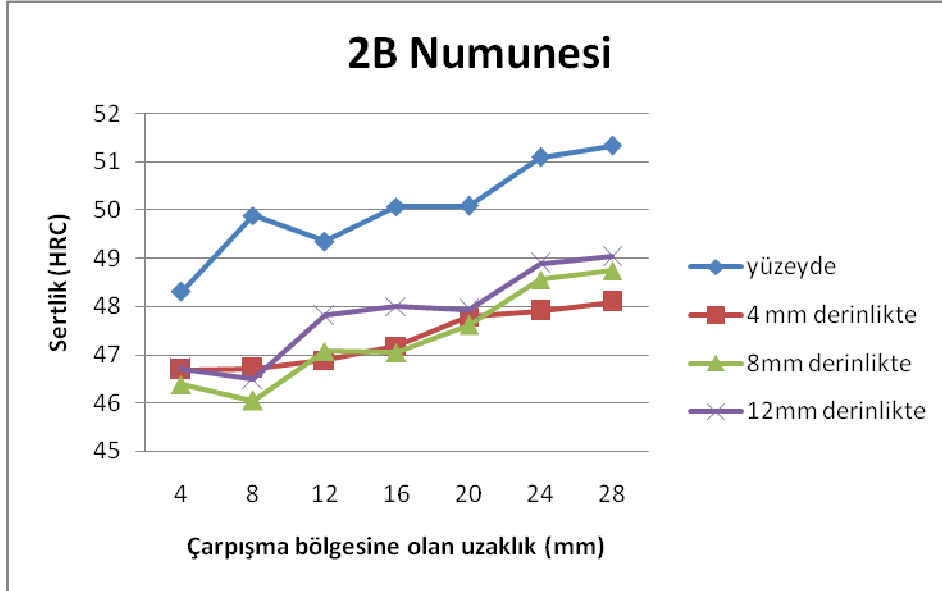
5.7. Çarpışma Bölgesi ve Kesitindeki İncelemeler

Çarpışma bölgesinde içyapılarda ne gibi değişiklikler olduğunu gözlemleyebilmek için denenen zırh malzemelerinin çarpışma bölgelerinden kesitler alınarak mikroskop altında incelemeler yapılmıştır. Yine bu kesitlerden sertlik ölçümleri yapılarak numunenin mekanik özelliklerinden sertliğinde ne gibi değişiklikler olduğu incelenmiştir. Çarpışma bölgesinde sertliklerin hangi bölgelerden alındığı deneysel bölümde detaylı olarak anlatılmıştır. Mermi çarpma bölgesinden itibaren uzaklaştıkça sertliğin nasıl değiştiği ve derinliğe göre bu sertlik dağılımındaki farklılıkların gösterimi en başarılı malzeme grubu olan 2 grubu numunelerden ~40 (A), ~50 (B) ve ~60 (D) HRC sertlikteki numuneler için sertlik dağılımları çıkarılmıştır. Şekil 5.7.1'de 2A grubu numuneler için sertliğin yüzeyde ve derinliğe göre mermi çarpma bölgesinden uzaklaştıkça nasıl değiştiği grafik halde verilmiştir. Bu grupta bulunan numuneler için mermi çarpma bölgesinde sertlik çarpışmaya uzak bölgelere göre göreceli olarak düşük çıkmıştır. Çarpışma bölgesinden uzaklaştıkça sertlik yüzeyde de derinde de yükselmiştir. İç bölgelerde sertlikler yüzeyden farklılık gösterirken kendi aralarında yakın sertlik değerleri vermişlerdir.



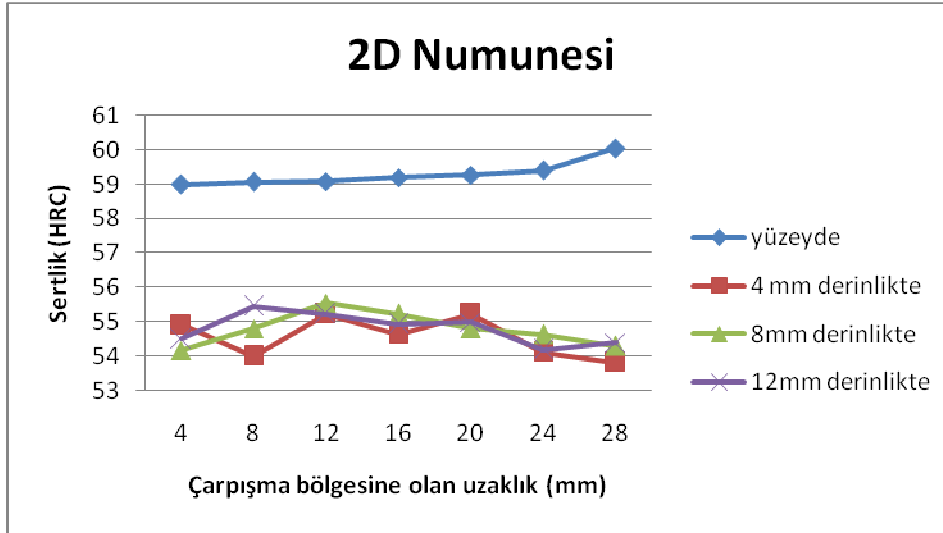
Şekil 5.7.1. 2A numuneleri için mermi çarpma bölgesinden uzaklaştıkça sertliğin nasıl değiştiğinin gösterimi. Yüzeyde de derinde de mermi çarpma bölgesinde bölgesel olarak sertlik düşük uzaklaştıkça göreceli olarak yüksektir.

2B numuneleri için 2A numunelerine banzer şekilde çarpışma bölgesi sertliği düşük iken uzaklaştıkça sertlik artmaktadır. Yüzey ile iç bölgeler arasında her mesafe için yaklaşık 2-3 HRC sertlik farkı gözlenmektedir. Şekil 5.7.2’de sertlik dağılımı verilmiştir.



Şekil 5.7.2. 2B numuneleri için sertlik dağılımlarının verilmesi. Yüzeyde de derinde de sertlik çarpışma bölgesinde düşük, çarpışmaya uzak bölgelerde yüksektir. İç bölgelerde sertlik değerleri birbirlerine yüzeye oranla daha yakın değerlerdedir.

2D numunelerinde diğer iki grubun aksine sertlik çarpma bölgesinde uzak bölgelere oranla çok düşük değildir. Yaklaşık değerlerdedir. Ancak yüzey ile iç bölgeler arasında ciddi sertlik değişiklikleri söz konusudur. Yaklaşık 4-5 HRC sertlik farkı göze çarpmaktadır. İç bölgelerde de yine çarpışma bölgesinde önemli bir sertlik düşüşü göze çarpmamaktadır. Şekil 5.7.3'de 2D numunesinde sertlik dağılımı sunulmuştur.

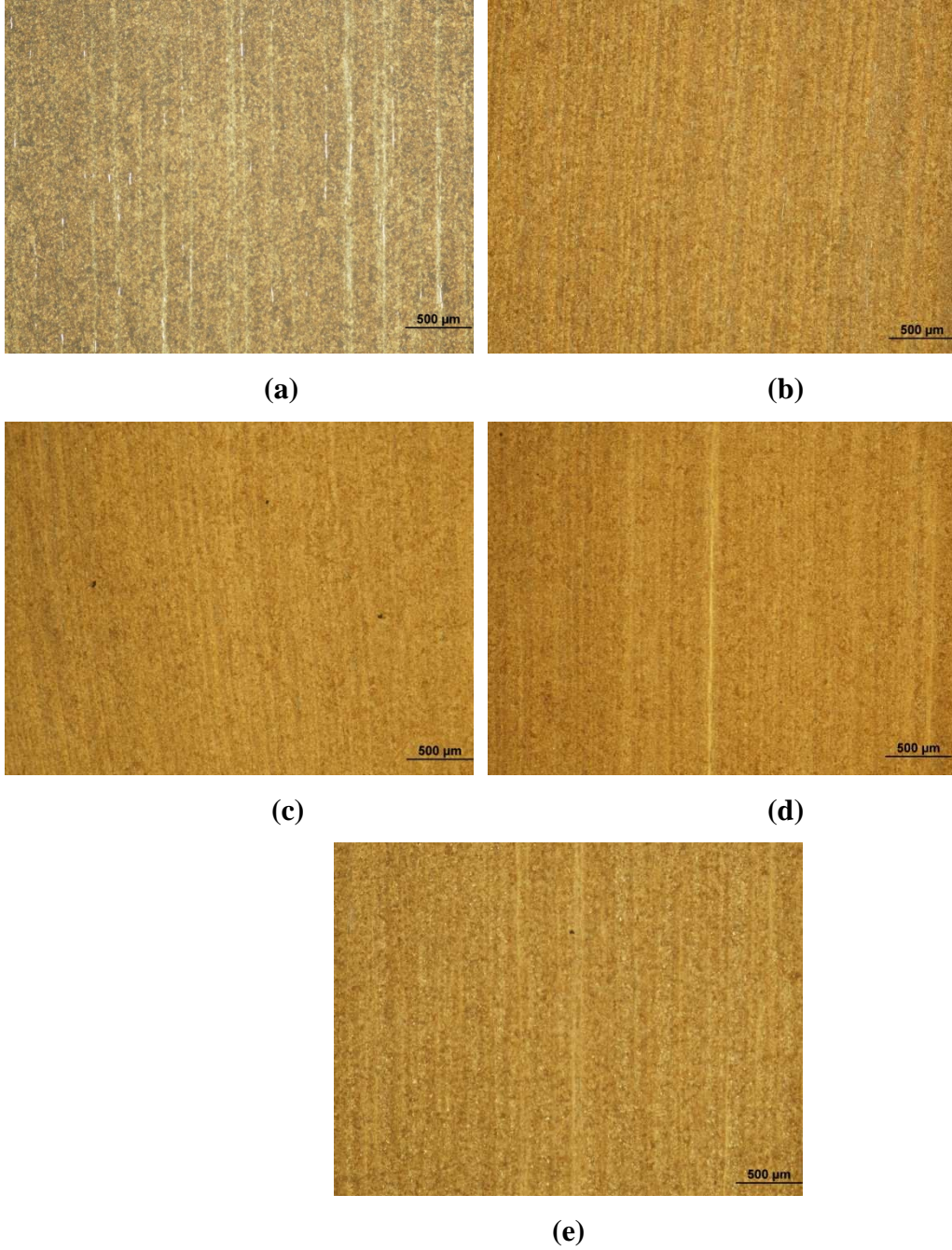


Şekil 5.7.3. 2D numunesinde mermi çarpma bölgesinden itibaren yüzeyde ve iç bölgelerde sertlik dağılımlarının sunulması.

Adyabatik Kayma Bantlarının İncelenmesi

Adyabatik kayma bantları yüksek ve geniş gerinim değerlerinde gözlenen bir durumdur. Bu bantlar dinamik çarpışma, metal şekillendirme, balistik deneyler, talaşlı imalat ve yüksek gerinim şekil değiştirme gibi birçok işlem sırasında gözlemlenebilir. Bu konuyu ilk ortaya atan Zener ve Hollomon [68] dir. Adyabatik kayma bölgesel olarak yüksek sıcaklıklara çıkılmasının ve bu sıcaklığın yüksek gerinimden ve malzemenin ısıl özelliklerinden dolayı bantın etrafına iletilmemesinden kaynaklanmaktadır [69]. Gerçekte mutlaka bantı çevreleyen bölgeye de ısı kaybı olacaktır. Ancak burada adyabatik teriminin kullanılmasının temel nedeni ısının çok büyük bir bölümünün bantın olduğu bölgede kalmasıdır. İşte bu yüksek sıcaklığın bölgesel olarak belirli süre bir noktada yoğunlaşması içyapı değişikliklerine neden olabilir [70]. Yüksek gerinme değerlerinde adyabatik kayma bantları öngörülemez şekilde gevrek kırılmalara neden olabilir [71,72]. Adyabatik kayma bantlarının (AKB) çeşitleri vardır. Başlıca bant çeşitleri; bozulmuş bantlar ve dönüşmüş bantlar olarak tanımlanabilir [69]. Bozulmuş bantlarda içyapıda değişiklik olmaz ancak tanelerin dizilimleri

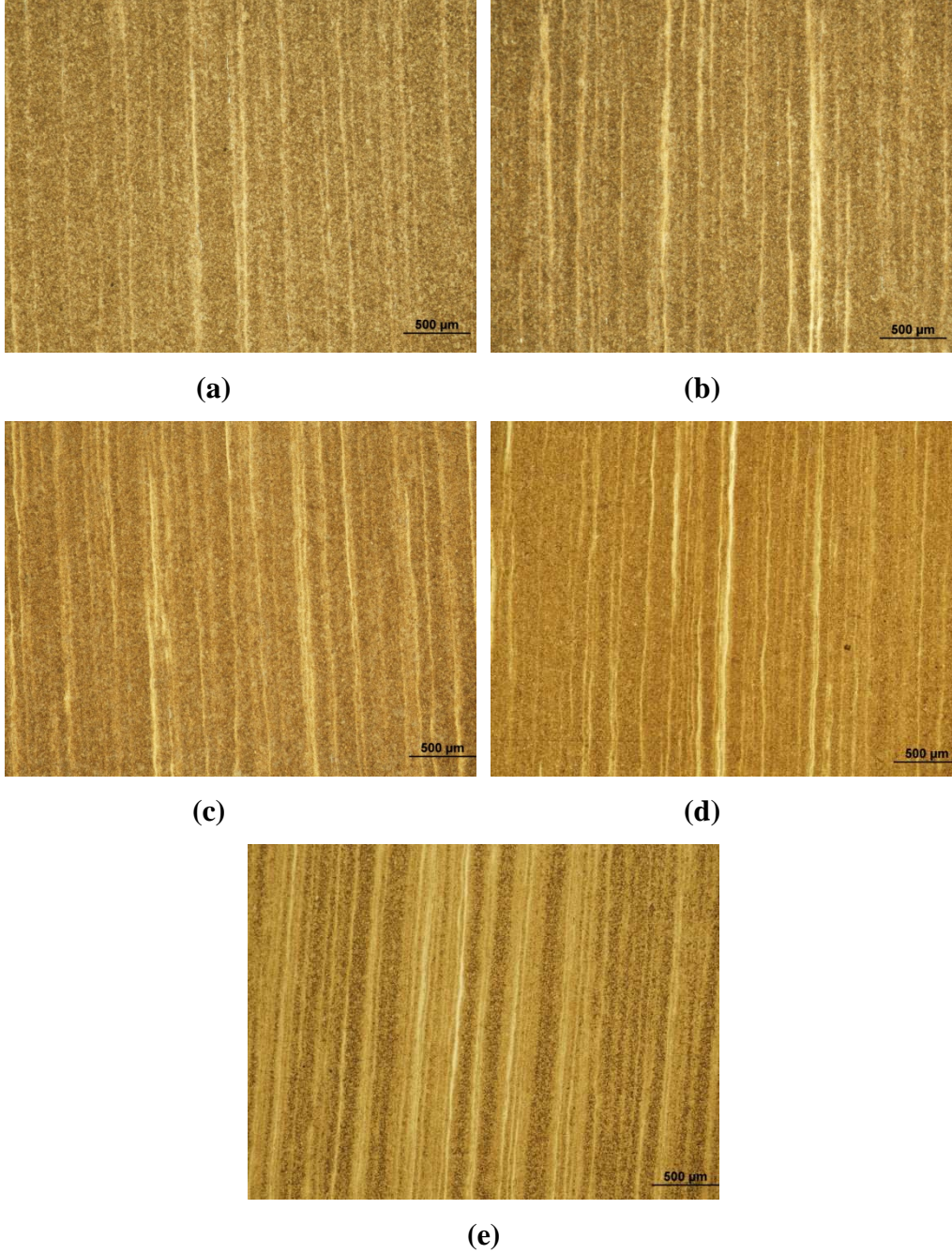
ve martenzit iğnelerinin yön değiştirmesi gibi yapıda bazı değişiklikler olur. Oysa dönüşmüş bantlarda kristalografik faz değişiklikleri söz konusudur. İçyapı numuneleri hazırlanıp dağlandığında dönüşmüş bantlar ışık mikroskopunda beyaz bir şerit olarak gözlenirken bozulmuş bantlar da sadece karşıtlık farkı göze çarpar. Ana faza göre daha koyu renkte görünürler. Yapılan balistik deneylerden sonra çelik numuneler için AKB numuneleri hazırlanarak mikroskop altında incelenmiştir. Gerek görüldüğü yerlerde daha ileri seviyede incelemeler yapabilmek için taramalı elektron mikroskopu (SEM) incelemeleri de yapılmıştır. Numunenin incelenen bölümü 5. Bölümde ayrıntılı olarak anlatılmıştır. Bu araştırmalardaki temel hedef sertliğin ve kalınlığın AKB yoğunluğunu nasıl etkilediğini, ortalama AKB genişliğinin alan yoğunluğuna dolayısıyla kalınlığa ve malzemenin sertliğine bağlı olarak nasıl değiştiğini ve bant ile ana faz arasındaki sertlik ve içyapı gibi özelliklerin nasıl değiştiğini belirlemektir. Bu açıdan her gruptaki malzemeden tüm alan yoğunluklarında incelemeler yapılmıştır. Daha sonra bantların ve ana fazın mikro sertlik değerleri mikro vickers cinsinden Beuhler Micromet 930 cihazı ile ölçülmüştür. İlk olarak kalınlığın AKB yoğunluğuna olan etkisi görmek için her bir gruptaki malzemelerin tüm alan yoğunluklarındaki mikro yapıları verilmiştir. Şekil 5.7.4'de 1A grubu zırh numunelerinde artan alan yoğunluğunda zırh da gözlemlenen AKB yoğunluğunun nasıl etkilendiği sunulmuştur.



Şekil 5.7.4. 1A Numunelerinde 1. alan yoğunluğundan (a), 5. alan yoğunluğuna (e) kadar alan yoğunluğuna bağlı olarak bant yoğunluğunun nasıl değiştiğinin gösterimi. Alan yoğunluğunun artmasıyla oluşan bant şeklinde (dönüşmüş-bozulmuş) bir değişiklik olmamıştır ancak AKB yoğunluğu belirgin şekilde artmıştır.

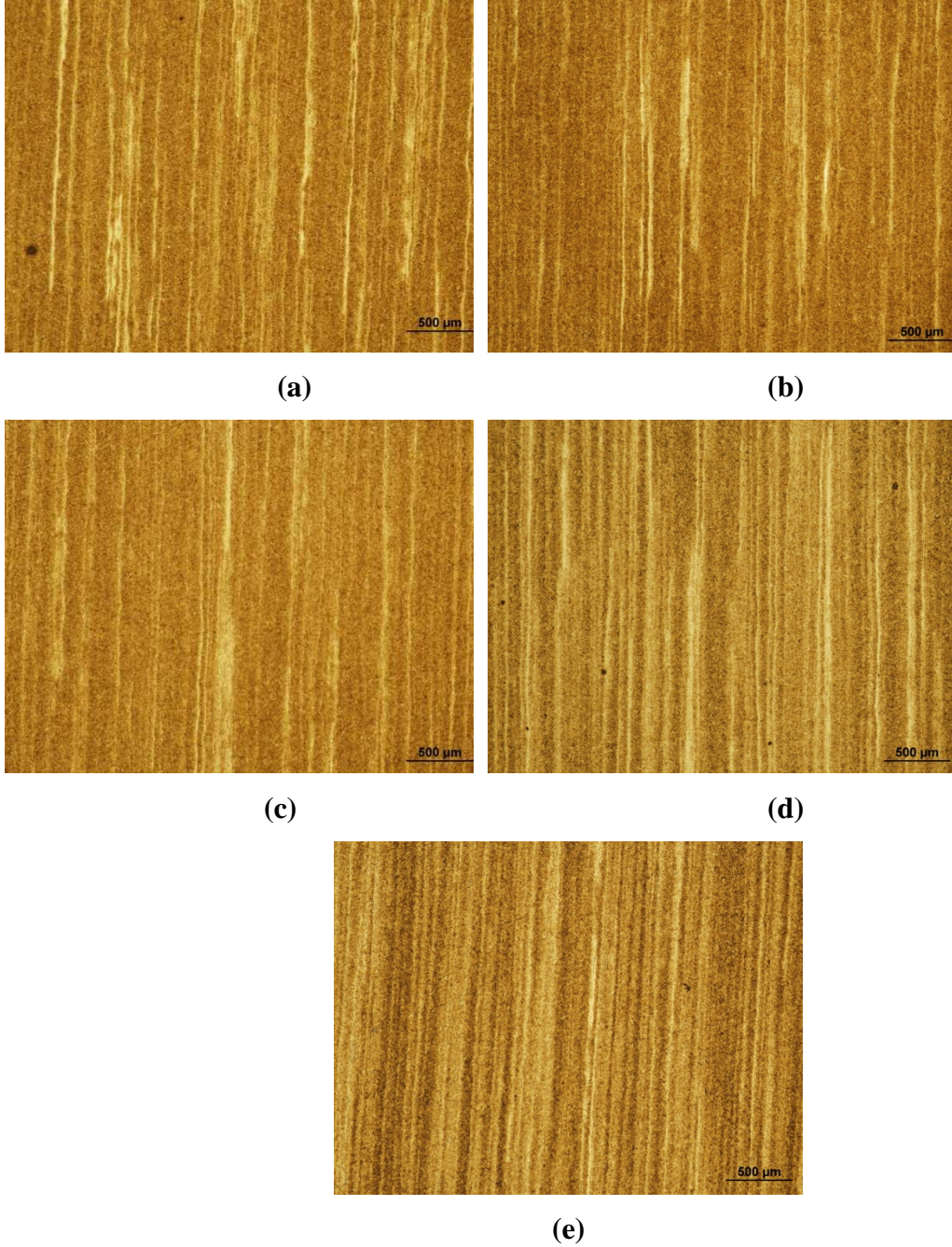
~40 HRC sertliğe sahip numunelerde oluşan bantlar tamamen bozulmuş bantlardır. Dönüşmüş bant gözlemlenmemiştir. Yaklaşık 50 HRC sertlikteki 1B numunelerde ise durum biraz daha

farklıdır. Şekil 5.7.5’de 1B numunelerinin artan alan yoğunluğuna göre iç yapı değişiklikler sunulmuştur.



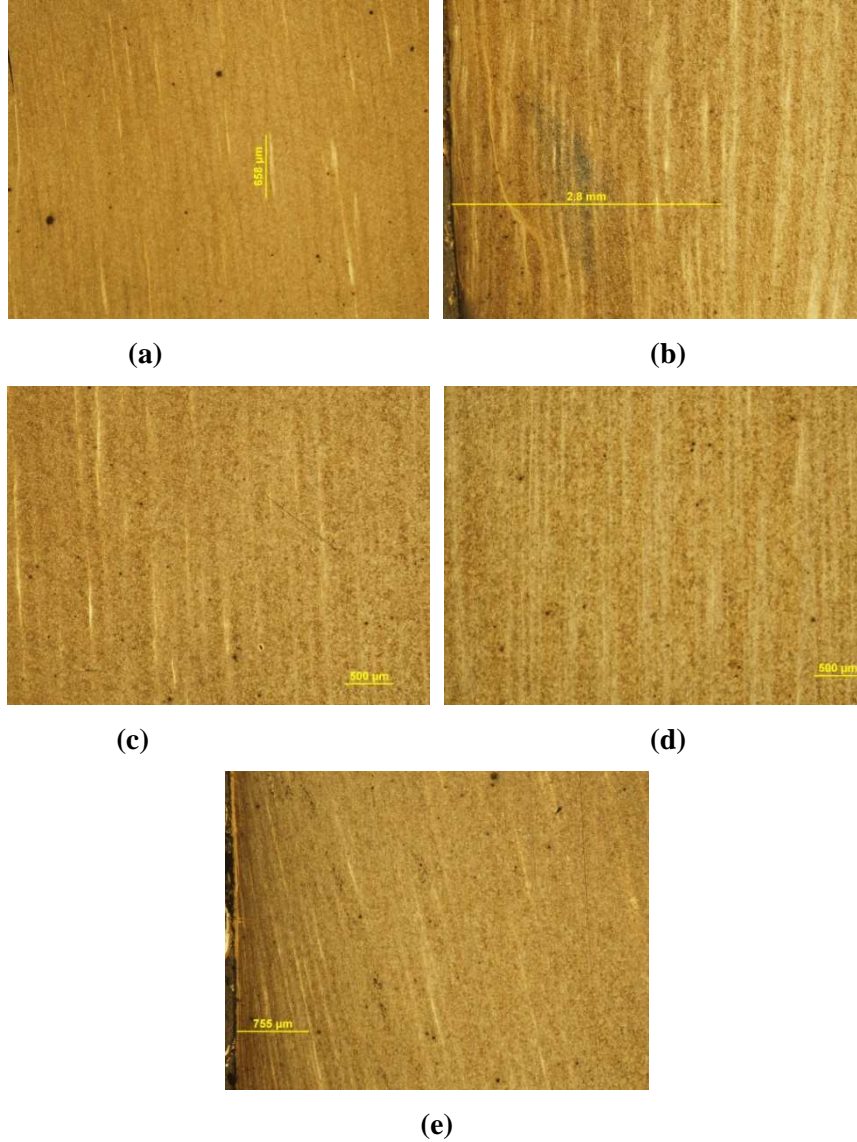
Şekil 5.7.5. 1B Numunelerinde 1. alan yoğunluğundan (a), 5. alan yoğunluğuna (e) kadar alan yoğunluğuna bağlı olarak bant yoğunluğunun nasıl değiştiğinin gösterimi. Artan alan yoğunluğu ile AKB yoğunluğu da belirgin şekilde artmıştır. Hem bozulmuş bantlar hem de dönüşmüş bantlar açıkça görülmektedir.

Şekil 5.7.6'da en yüksek sertlikteki malzeme grubu olan 1D numunelerinde de benzer durum söz konusudur. 1D grubu numunelerinin artan alan yoğunluğu ile birlikte bant yoğunluğundaki değişim sunulmuştur. (Şekil 5.7.6)



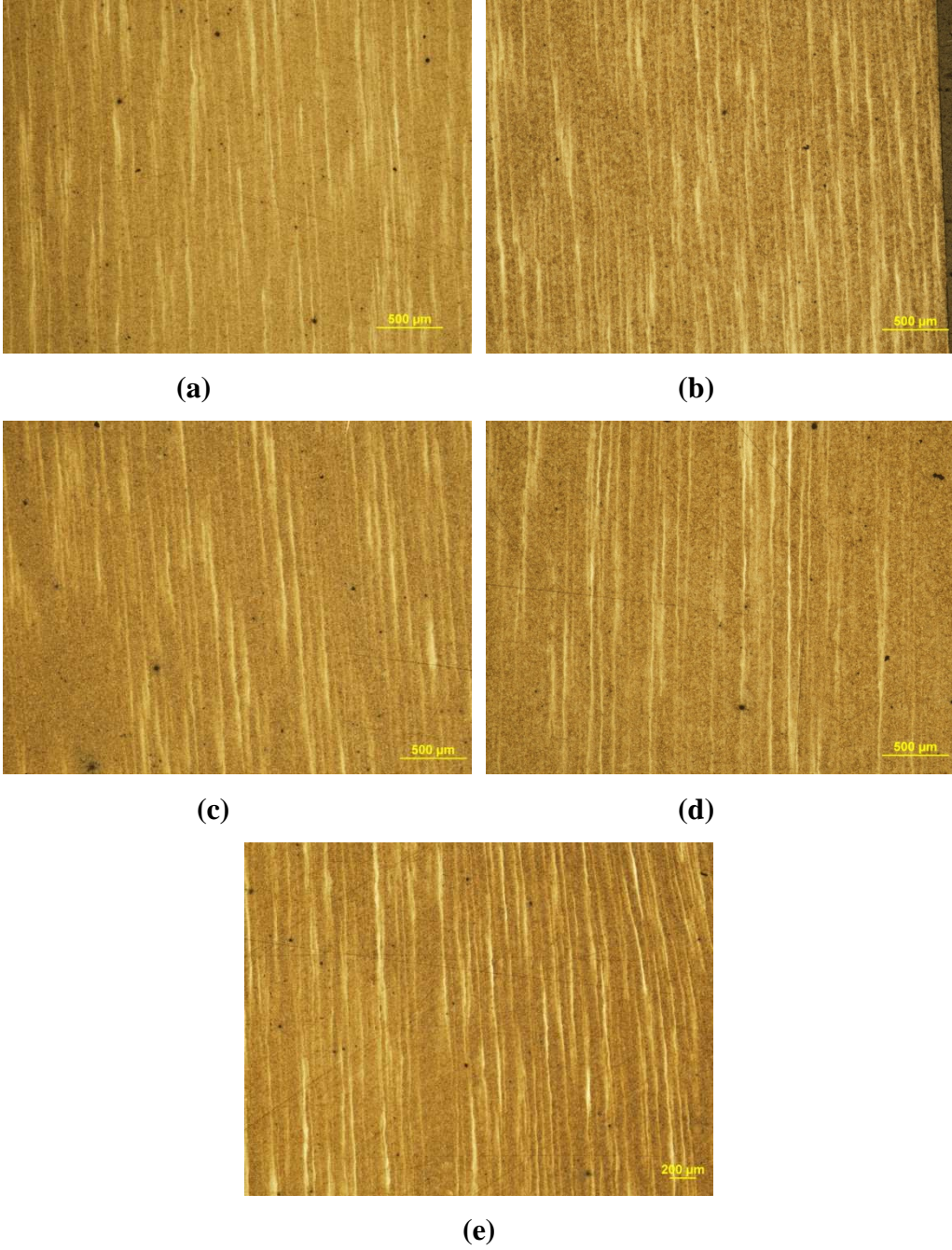
Şekil 5.7.6. 1D Numunelerinde 1. alan yoğunluğundan (a), 5. alan yoğunluğuna (e) kadar alan yoğunluğuna bağlı olarak bant yoğunluğunun nasıl değiştiğinin gösterimi. Artan alan yoğunluğu ile AKB yoğunluğu da belirgin şekilde artmıştır. Hem bozulmuş bantlar hem de dönüşmüş bantlar açıkça görülmektedir.

Numunelerin sertliği arttıkça oluşan bant çeşitleri de bant yoğunlukları da görüldüğü gibi değişmektedir. Göreceli olarak düşük sertlikteki zırh numunelerinde yalnızca bozulmuş bantlar oluşurken sertlik arttıkça hem bant yoğunluğunda artış hem de oluşan bantların dönüşmüş ve bozulmuş bantlar olduğu görülmektedir. ~50 HRC sertlikten ~60 HRC sertliğe çıkıldığında bant yoğunluğu ile birlikte oluşan dönüşmüş bant miktarı da artmıştır. Şekil 5.7.7'de 2 Grubu numunelerinde 2A numunelerinin içyapı görüntüleri alan yoğunluklarına göre sırasıyla verilmiştir.



Şekil 5.7.7. 2A Numunelerinde 1. alan yoğunluğundan (a), 5. alan yoğunluğuna (e) kadar alan yoğunluğuna bağlı olarak bant yoğunluğunun nasıl değiştiğinin gösterimi. Alan yoğunluğunun artmasıyla oluşan bant şeklinde (dönüşmüş-bozulmuş) bir değişiklik olmamıştır ancak AKB yoğunluğu göreceli olarak artmıştır.

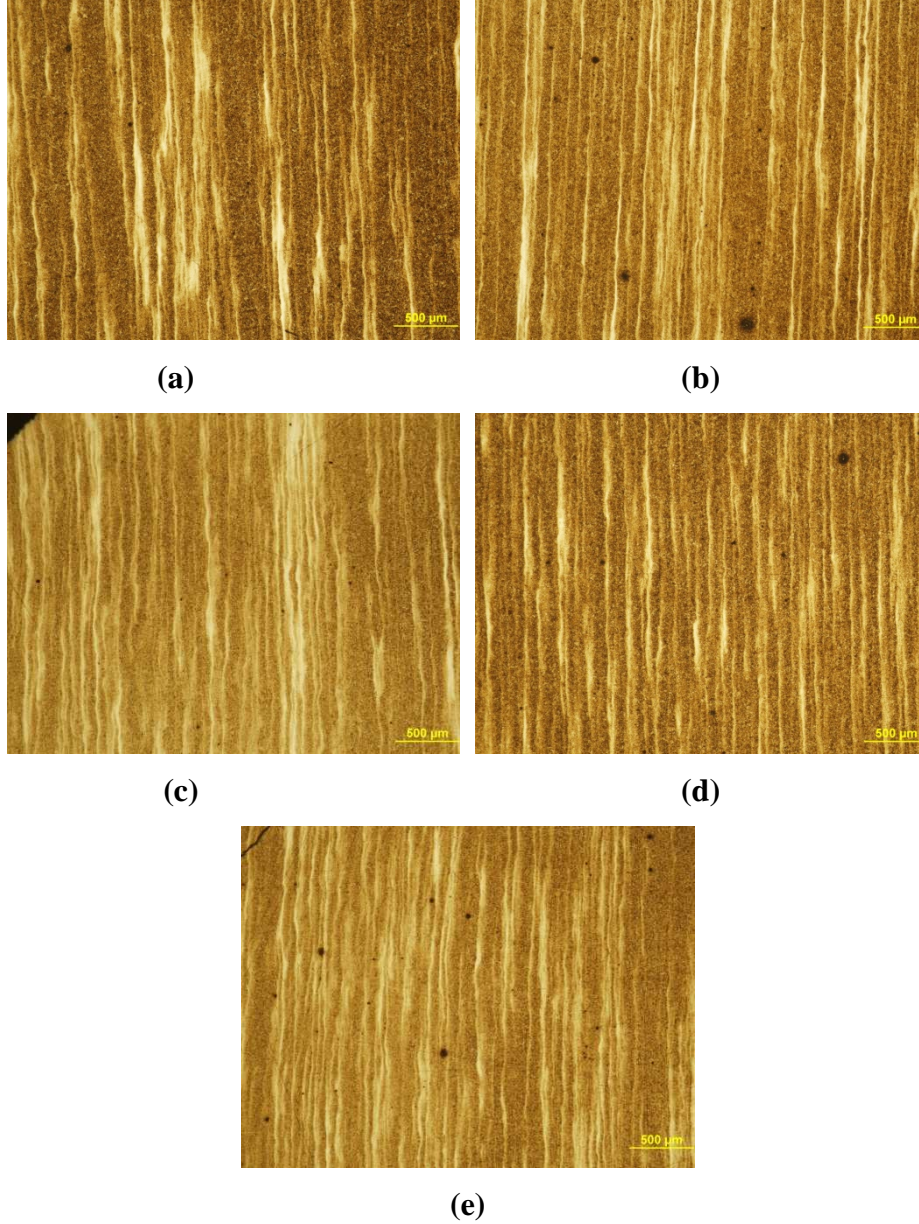
Şekil 5.7.8'de 2B numunelerinde alan yoğunluğunun AKB oluşumuna, AKB yoğunluğunun artışına etkileri sunulmuştur.



Şekil 5.7.8. 2B Numunelerinde 1. alan yoğunluğundan (a), 5. alan yoğunluğuna (e) kadar alan yoğunluğuna bağlı olarak bant yoğunluğunun nasıl değiştiğinin gösterimi. Artan alan yoğunluğu ile AKB yoğunluğu da belirgin şekilde artmıştır. Hem bozulmuş bantlar hem de dönüşmüş bantlar görülebilmektedir.

2B numunelerinden 2. alan yoğunluğu göz ardı edilirse artan alan yoğunluğu ile bant yoğunluğu artmıştır. Ancak 2. alan yoğunluğunda kendisinden daha yüksek alan yoğunluklarından daha yüksek bant yoğunluğu gözlenmiştir. 2B2 numuneleri balistik deneylerde en başarılı zırh numuneleri

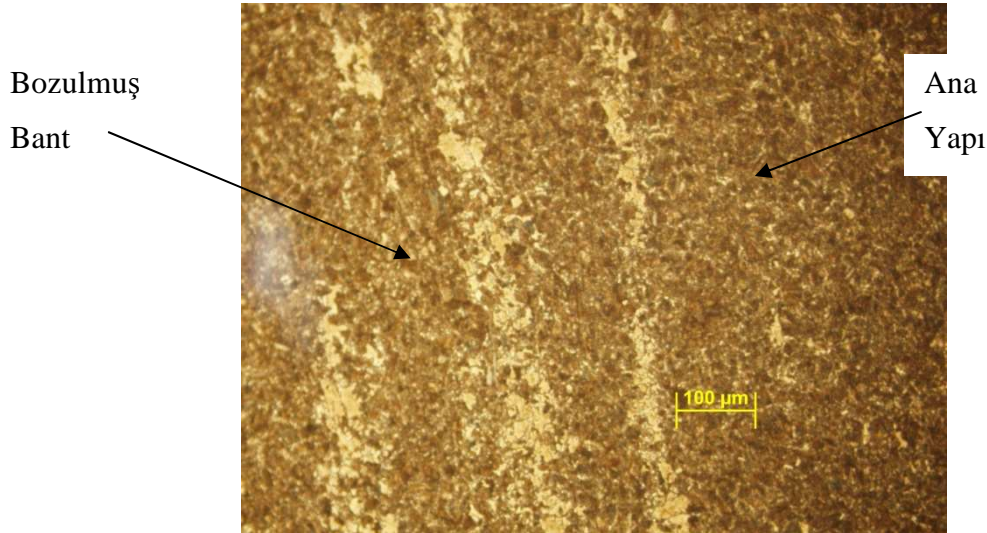
olmuştur. Şekil 5.7.9'da 2D grubu numunelerinin bant yoğunluğu-alan yoğunluğu ilişkisi sunulmuştur.



Şekil 5.7.9. 2D Numunelerinde 1. alan yoğunluğundan (a), 5. alan yoğunluğuna (e) kadar alan yoğunluğuna bağlı olarak bant yoğunluğunun nasıl değiştiğinin gösterimi. Artan alan yoğunluğu ile AKB yoğunluğu da belirgin şekilde artmıştır. Hem bozulmuş bantlar hem de dönüşmüş bantlar açıkça görülmektedir.

Örnek olarak incelenen 1 ve 2 grubu numunelerde görüldüğü gibi alan yoğunluğu arttıkça bant yoğunluğu da artmaktadır. Öte yandan artan alan yoğunluğu oluşan bant türünde önemli bir değişikliğe neden olmamaktadır. Bant türünü değiştiren en önemli etmen sertlik olarak göze çarpmaktadır. Sertlik arttıkça bozulmuş bantların yerini dönüşmüş bantlar almaktadır.

Oluşan bant çeşitleri ve bu bantların yoğunlukları Çizelge 5.7.1’de verilmiştir. 0A ve 1A grubu numunelerde nadiren gözlenen dönüşmüş bantları saymazsak yalnızca bozulmuş bantlar gözlemlenirken 1B ve 1D grubunda 2B ve 2D gruplarında da olduğu gibi hem bozulmuş hem de dönüşmüş bantlar gözlemlenmiştir. B gruplarında (~50 HRC) daha çok bozulmuş bant ve az sayıda dönüşmüş bant gözlemlenirken, D gruplarında (~60 HRC) dönüşmüş bant sayısında artış gözlenmiştir. 3 grubu numunelerde ise benzer şekilde 3A’da yalnızca bozulmuş bantlar gözlenirken B ve D gruplarında az sayıda dönüşmüş bantla birlikte hem dönüşmüş hem de bozulmuş bantlar bir arada gözlemlenmiştir. Oluşan bant çeşitlerinin numunelere göre dağılımı göstermek amacıyla numunelerin yüksek büyütmelelerdeki görüntüleri ve oluşan bant çeşitlerinin sergilenmesi aşağıda sunulmuştur. Şekil 5.7.10’da 0A numunelerinde oluşan ve genel olarak rastlanan bozulmuş bant sunulmuştur.



Şekil 5.7.10. 0A numunelerinde genel olarak gözlenen bozulmuş bantların sunulması. Genel yapı pörlit, ana yapı içinde yüksek şekil değiştirme hızına bağlı olarak oluşan bozulmuş bantların gösterimi.

Çizelge 5.7.1(a). 1. Grup numunelerde oluşan bant tipleri ve ortalama bant genişliği.

Grup numarası	Ortalama Bant Genişliği (μm)	Bant Tipi
1A1	27	Bozulmuş
1A2	28	
1A3	36	
1A4	25	
1A5	42	
1B1	56	Bozulmuş
1B2	49	
1B3	34	
1B4	51	
1B5	49	
1B1	21	Dönüşmüş
1B2	24	
1B3	25	
1B4	32	
1B5	36	
1D1	35	Bozulmuş
1D2	41	
1D3	25	
1D4	54	
1D5	40	
1D1	19	Dönüşmüş
1D2	32	
1D3	25	
1D4	25	
1D5	35	

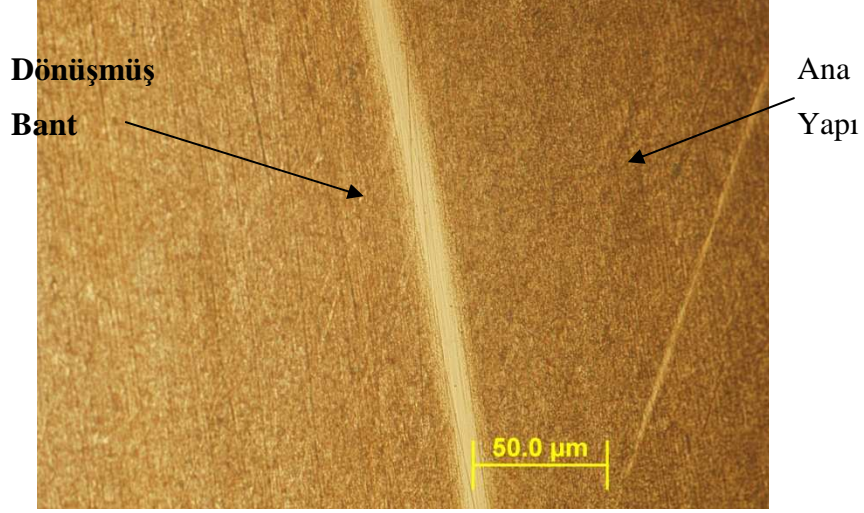
Çizelge 5.7.1(b). 2. Grup numunelerde oluşan bant tipleri ve ortalama bant genişliği.

Grup numarası	Ortalama Bant Genişliği (μm)	Bant Tipi
2A1	24	Bozulmuş
2A2	27	
2A3	32	
2A4	29	
2A5	40	
2B1	24	Bozulmuş
2B2	36	
2B3	34	
2B4	35	
2B5	33	
2B1	32	Dönüşmüş
2B2	34	
2B3	39	
2B4	37	
2B5	43	
2D1	25	Bozulmuş
2D2	31	
2D3	29	
2D4	46	
2D5	43	
2D1	21	Dönüşmüş
2D2	34	
2D3	35	
2D4	29	
2D5	38	

Çizelge 5.7.1(c). 3. Grup numunelerde oluşan bant tipleri ve ortalama bant genişliği.

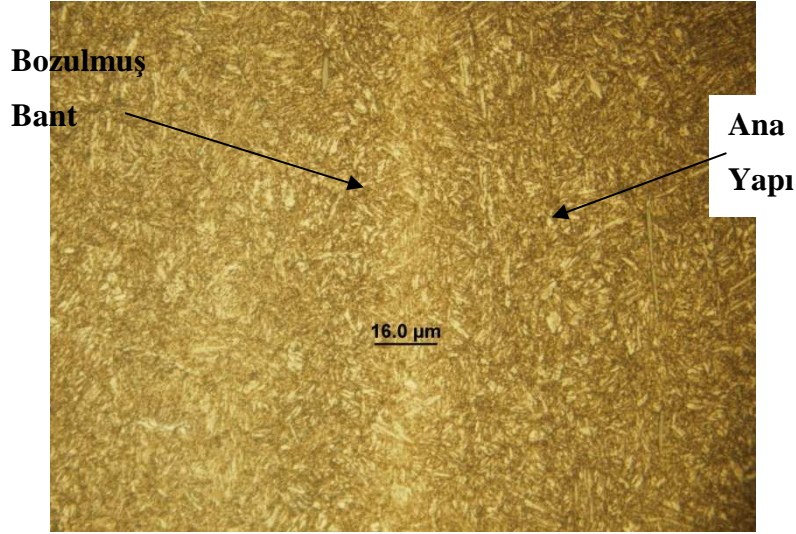
Grup numarası	Ortalama Bant Genişliği (μm)	Bant Tipi
3A1	22	Bozulmuş
3A2	23	
3A3	26	
3A4	36	
3A5	39	
3B1	46	Bozulmuş
3B2	43	
3B3	54	
3B4	51	
3B5	47	
3B1	23	Dönüşmüş
3B2	27	
3B3	22	
3B4	34	
3B5	39	
3D1	32	Bozulmuş
3D2	39	
3D3	34	
3D4	43	
3D5	49	
3D1	17	Dönüşmüş
3D2	22	
3D3	25	
3D4	23	
3D5	30	

0A numunelerinde genelde gözlenen bozulmuş bantlar sunulurken 1A numunelerinde de nadiren gözlenen dönüşmüş bantlara bir örnek Şekil 5.7.11’de sunulmuştur.



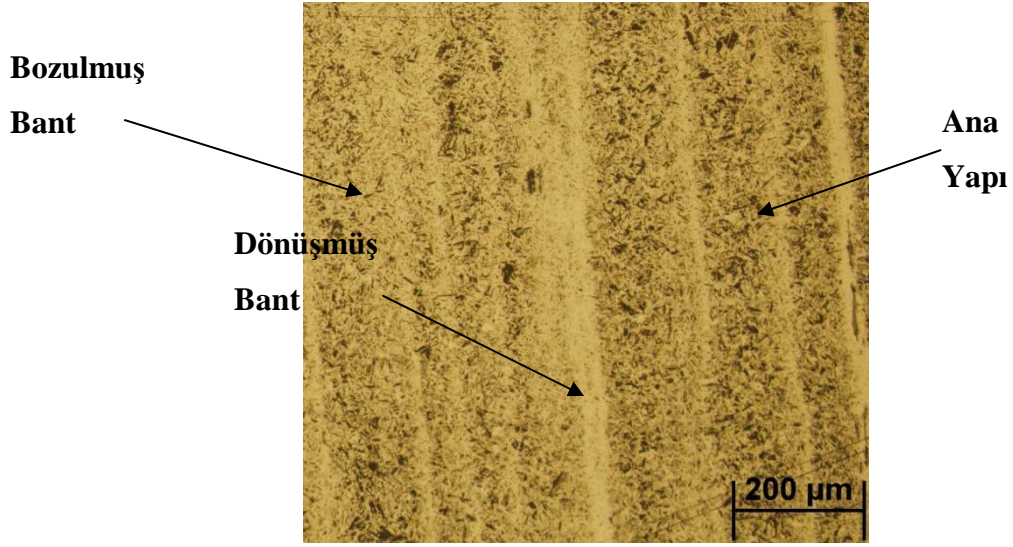
Ŗekil 5.7.11. 1A numunelerinde çok nadir rastlanan dnŖmŖ bant oluŖumu.

Ŗekil 5.7.12'de de 1A grubu numunelerin balistik deneylerinden sonra genelde elde edilen bozulmuŖ bant oluŖumu gsterilmiŖtir.



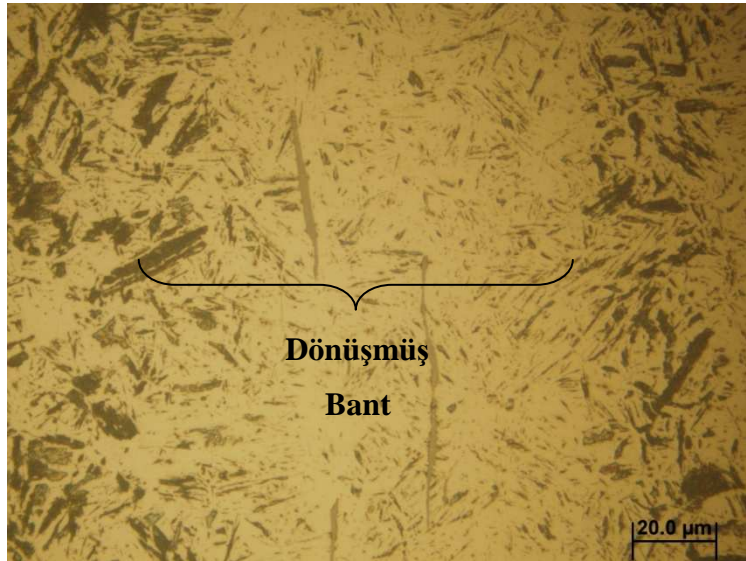
Ŗekil 5.7.12. 1A numunelerinde sıklıa rastlanan bozulmuŖ bant oluŖumu. Ana yapı bozulmuŖ martenzit, bant ile ana yapı arasında yapısal farklılık olmamasına rağmen martenzit ııtalarında yönelim farklılıklarından kaynaklanan karŖıtlık farklılıkları vardır.

1B ve 1D grubu numunelerinde gözlenen dnŖmŖ ve bozulmuŖ bantların bir arada bulunduğu yapıardan 1D numunelerine ait bir görüntü de Ŗekil 5.7.13'de verilmiŖtir.



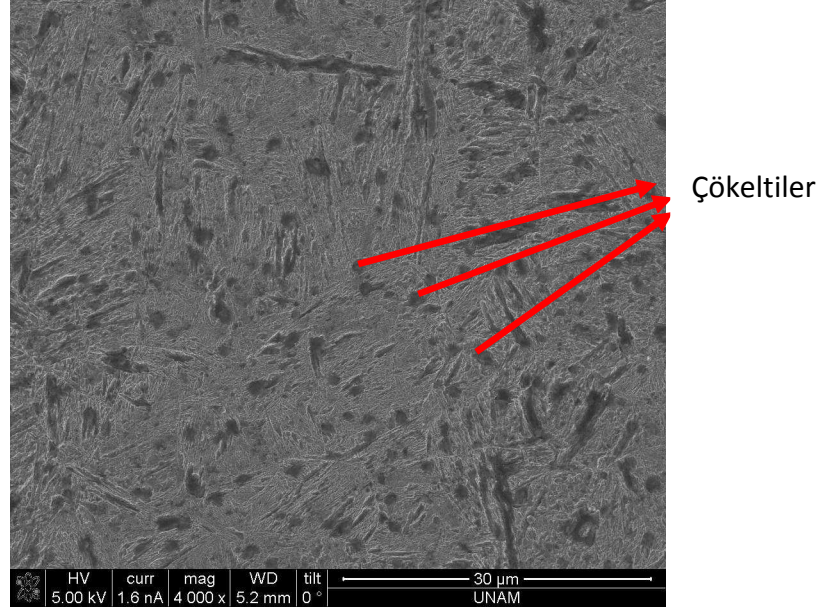
Şekil 5.7.13. Yüksek sertliğe sahip 1D5 numunesinde gözlemlenen dönüştürmüş ve bozulmuş bantların bir arada olduğu yapı.

Dönüştürmüş ve bozulmuş bantların bir arada gösterildiği Şekil 5.7.13'deki yapının daha yüksek büyütmede nasıl görüldüğü Şekil 5.7.14'de verilmiştir.

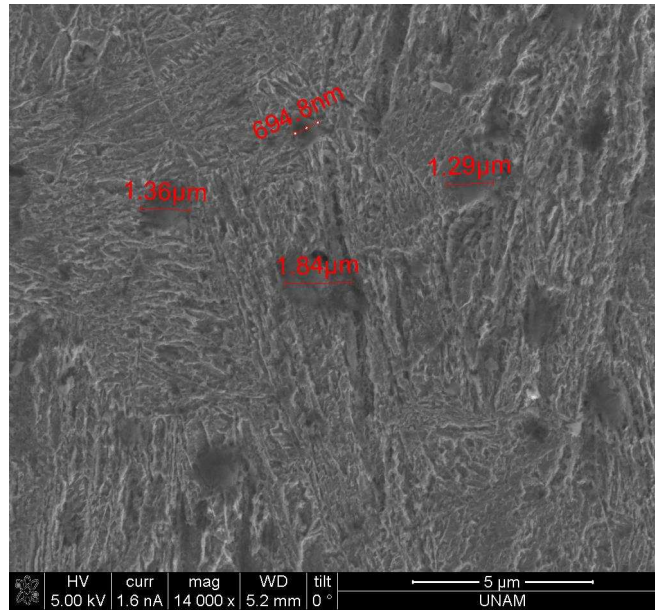


Şekil 5.7.14. 1D5 numunesinde dönüştürmüş bant ve çatlak oluşumunun birlikte gösterimi. Çatlak oluşumu ve kırılma başlangıcı dönüştürmüş bant üzerinde başlamış. Ana yapı ile dönüştürmüş yapı arasında belirgin yapısal farklılıklar vardır.

Şekil 5.7.14'de verilen yapıdaki içyapısal değişiklikleri daha iyi anlamak için elektron mikroskopu (SEM) ve odaklanmış iyon demeti (FIB) ile incelenmiştir. Şekil 5.7.15'de dönüştürmüş bir bant üzerinden alınan görüntüler verilmiştir.



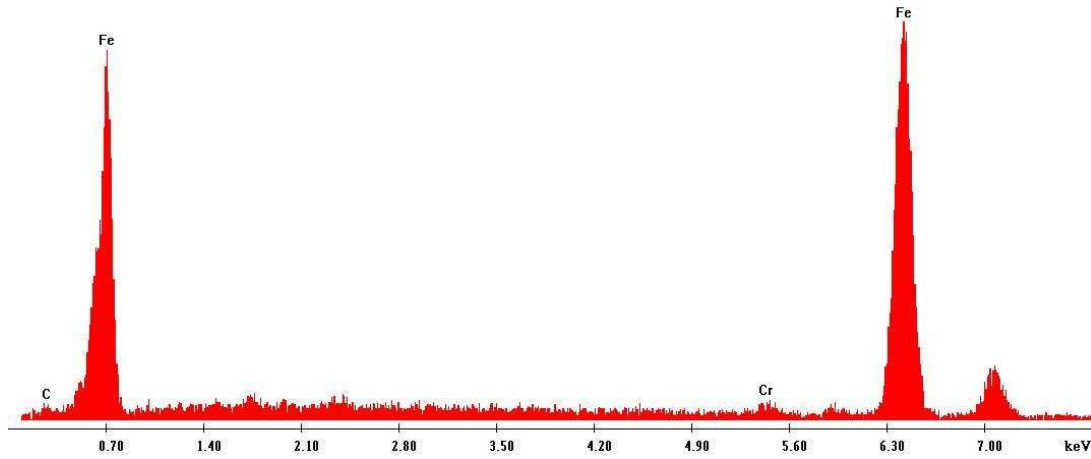
(a)



(b)

Şekil 5.7.15. Dönüşmüş bant iç yapısının elektron mikroskopi görüntüsü. (a)'da iç yapıdaki çok küçük taneler ve çökeltiler görülmektedir. (b)'de ise bu çökeltilerin büyüklükleri belirlenmiştir. Genel olarak yaklaşık $\sim 1\mu\text{m}$ çaplı çökeltiler gözlemlenmiştir.

Elektron mikroskopi incelemeleri de iç yapısal değişiklikler olduğunu kanıtlamıştır. Çok ince tane yapısı ve bununla birlikte çökeltiler elde edilmiştir. Çökeltilerin içeriklerini belirlemek amacıyla çökeltiler üzerinden enerji dağılım spektroskopisi (EDS) incelemesi yapılmıştır. Çökelti üzerinden alınan analizin sonucu Şekil 5.7.16'da sunulmuştur.



Şekil 5.7.16. EDS element incelemesi sonucu. Çökeltinin bir karbür olma olasılığı yüksektir.

İçyapısal değişikliklerden yola çıkarak mekanik özelliklerin de bundan etkilendiği söylenebilir. Bu durumu kontrol etmek için dönüşmüş bantlardan, bozulmuş bantlardan ve ana yapıdan mikro sertlik ölçümleri yapılmıştır. Çizelge 5.7.2’de Bantların üzerinden alınan sertlik değerleri çizelge halinde verilmiştir.

Çizelge 5.7.2(a). 1. Grup numuneler için bantların çeşitlerine göre ve ana metalin mikro sertlik değerlerinin sunulması.

Numune Grubu	Bant Tipi	Bant Sertliği (HV)	Ana Metalin Sertliği (HV)
1A	Bozulmuş	344	320
1B	Bozulmuş	519	417
	Dönüşmüş	569	
1D	Bozulmuş	695	667
	Dönüşmüş	722	

Çizelge 5.7.2(b). 2. Grup numuneler için bantların çeşitlerine göre ve ana metalin mikro sertlik değerlerinin sunulması.

Numune Grubu	Bant Tipi	Bant Sertliği (HV)	Ana Metalin Sertliği (HV)
2A	Bozulmuş	378	356
2B	Bozulmuş	483	453
	Dönüşmüş	512	
2D	Bozulmuş	632	614
	Dönüşmüş	694	

Çizelge 5.7.2'den de rahatlıkla görülebileceği gibi bantların sertlikleri ana metalin sertliğine göre daha yüksek çıkmaktadır. Bunun nedeni bozulmuş bantlarda martenzit çıtaların yönlerindeki değişikliğe neden olan yüksek gerinim değerleridir. Yüksek gerinim şartında kafes gerilmeleri artacağında daha yüksek sertlik değerleri elde edilir. Dönüşmüş bantlar içinse yapısal dönüşüm ve oldukça küçük taneler elde edilmesi sertliği önemli ölçüde artırmaktadır. Oluşan çökelti de yine sertliği artıran en önemli etmenlerden biridir. Dönüşmüş bantlarda daha önce Şekil 5.7.14'de de gösterildiği gibi çatlak oluşumu başlar. Bu çatlaklar numunenin ani şekilde parçalanmasına neden olabilir. Dikkat edilecek olursa dönüşmüş bantlar genel ve yoğun olarak yüksek sertlikli numunelerde görülmektedir. Makro incelemeler sırasında çok sayıda parçaya ayrılan ve ani şekilde parçalanan zırh numunelerinin tamamı, dönüşmüş bantların çokça görüldüğü 50 HRC ve üzeri sertliklere sahip numunelerdir.

BÖLÜM 6

6. ANALİTİK YÖNTEMLERİN BÜTÜNCÜL ZIRHLAR İÇİN İNCELENMESİ

Yapılan literatür taramasında bulunan analitik yaklaşımlar enerji ve momentum yöntemlerine bağlı olarak merminin bağıl hızının bulunmasını ya da balistik koruma sağlanılacak kalınlığın belirlenmesini amaçlamaktadır [73]. Bir diğer yaklaşım da hasar şekillerinin sınıflandırılması şeklindedir. İki alanda da ilk çalışmaları yapan Woodward [74], diğer araştırmacıların çalışabileceği bir alan açmıştır. Literatürdeki birçok çalışma Woodward'ın yaklaşımını temel almaktadır. Bununla beraber birçok araştırmacı bu model üzerinde çalışıp yeni değişkenler ve balistik koruma sınırını etkileyen etmenleri de hesaba katarak yeni yaklaşım ve modeller ortaya atmışlardır. Örneğin, Madhu ve Gupta [75,76], iki farklı çalışmada Woodward yaklaşımını temel alarak ve gerilme etkilerini de hesaba katarak merminin bağıl hızını ya da balistik koruma sağlayan kalınlığı belirlemeye çalışmışlardır. Bu tür çalışmalar içinde Thompson [77], yaklaşımı ile deneysel sonuçlarla göreceli olarak en iyi uyuma sahip modeli ortaya koymuştur.

6.1. Lambert Modeli

Lambert, merminin çıkış hızının belirlenmesi için aşağıdaki ifadeyi ortaya atmıştır;

$$\begin{aligned} V_r &= 0, & 0 \leq V_0 \leq V_{BL} \\ V_r &= \alpha (V_i^p - V_{BL}^p)^{1/p}, & V_i > V_{BL} \end{aligned} \quad (6.1)$$

$$\alpha = \frac{m_p}{m_p + M^{1/3}}; \quad p = 2 + \frac{z}{3}; \quad z = \frac{t}{D} \sec^{0,75} \theta, \quad (6.2)$$

Bu ifadelerde;

- V_r ; merminin bağıl hızı,
- V_0 ; merminin giriş hızı,
- V_{BL} ; Balistik korumanın sağlanabildiği en yüksek hızı,
- m_p ; merminin kütesini,
- M ; hedefin kütesini,
- t ; hedefin kalınlığını,

- D; merminin çapını,
 θ ; eğiklik açısıdır [rad].

6.2. Madhu Modeli

Bu model de merminin çıkış hızına bağlı bir yaklaşımdır. Mermi çıkış hızı için model;

$$V_r = V_0 - Kt^2 \quad (6.3)$$

Bu ifadede;

V_r ; bağıl hızı, V_0 ; mermi giriş hızını, t ; hedef kalınlığını ve K ; hedef malzemesine ve mermi hızına bağlı bir fonksiyonu ifade eder. K değeri Madhu tarafından bazı malzemeler için ve 820 m/s hızdaki mermiler için verilmiştir. Ancak bu değerler deneysel sonuçlarla elde edildiğinden ve bu tez çalışmasında kullanılan malzemeler için K değerleri verilmediğinden bu yöntem kullanılmamıştır.

Madhu (6.3) ifadesinden t 'yi çekerek balistik koruma sağlayan kalınlığı hesaplamıştır. Ancak bu modelde mekanik özellikler hesaba katılmamıştır. Yalnızca sertlik etkisini incelemiştir. Bunun için geliştirdiği ifade;

$$\ln(t^*) = 6,65 - \frac{2}{3} \ln(H) \quad (6.4)$$

Bu ifadede;

t^* ; balistik koruma sağlayan kalınlığı [mm] ve H ; malzemenin sertliğini [HB] belirtir. Bu ifade yalnızca alüminyum malzemeler için türetilmiştir.

Model genel olarak deneysel sonuçlara dayandığından ve kullanılan malzemeler tez çalışması kapsamında denenmediğinden kullanılmamıştır.

6.3. Gupta Modeli

Gupta, mermi çıkış hızını belirlemek için aşağıdaki ifadeyi kullanmıştır.

$$V_R = -k_1 t^2 + V_0 \quad (6.5)$$

Bu ifadede;

$V_0 = 820 \text{ m/s}$, çarpma hızını (giriş hızı)

t , milimetre cinsinden ise $k_1 = 1.05$ 'i

V_R , normal çarpmadaki bağıl hızı belirtir.

Bu durumda,

$$V_R = -1.05t^2 + 820 \quad (6.6)$$

(6.5) numaralı denklem şu şekilde de yazılabilir:

$$\frac{V_R}{V_0} = [1 - (t/t^*)^2] \quad (6.7)$$

t^* , levha kalınlığı (balistik sınır)

Boyutsuz hız düşümünün yüzde değeri

$$V_d = \frac{V_0 - V_R}{V_0} \times 100 \quad (6.8)$$

Boyutsuz hız düşümü

$$V_d = \exp(k_2\theta) + k_3 \quad (6.9)$$

Bu ifadeye;

θ , eğiklik açısını,

k_2 ve k_3 levha kalınlığı t 'nin fonksiyonlarını

k_3 ün değeri yukarıdaki denklemde normal çarpma koşulları ($\theta=0^\circ$) kullanılarak aşağıdaki gibi bulunur:

$$(V_d)_0 = 1 + k_3 \quad (6.10)$$

$$k_3 = (V_d)_0 - 1 \quad (6.11)$$

Bu ifadeye $(V_d)_0$ normal çarpmadaki hız düşümüdür.

(6.5) numaralı denklemden;

$$V_0 - V_R = k_1 t^2 \quad (6.12)$$

Veya

$$(V_d)_0 = \frac{V_0 - V_R}{V_0} \times 100 = \frac{k_1}{V_0} t^2 \times 100 \quad (6.13)$$

$k_1 = 1.05$ ve $V_0 = 820 \text{ m/s}$ için;

$$(V_d)_0 = 0.128 \times t^2 \quad (6.14)$$

Bu değeri (6.11) numaralı denklemde yerine koyarsak,

$$k_3 = 0.128 \times t^2 - 1 \quad (6.15)$$

820 m/s'lik mermi hızı için herhangi bir açıdaki balistik sınır;

$$\theta_b = k_4 \times (1 - t/t^*)^{1/2} \quad (6.16)$$

Bu eşitlik $k_4 = 70^\circ$ için en iyi sonuçları vermektedir.

$$k_2 = \frac{\ln(100 - k_3)}{\theta_b} \quad (6.17)$$

Kritik sekme açısı:

$$\theta_c = 90 - 13 \times \ln(t) \quad (6.18)$$

Bu model de Madhu modeli gibi kendi yaptıkları deney sonuçlarına uyumlu sabitler kullanılarak ortaya çıkarılmıştır. Ancak belirtildiği gibi modelin uygulanabilmesi için gerekli olan sabitler çalışmada kullanılan malzemeler için belirlenmemiştir.

6.4. Woodward Modeli

Woodward birçok araştırmacıya yol gösterecek olan modelini enerji eşitliği ile ifade etmiştir. Buna gore;

$$\frac{1}{2}mV_0^2 = \pi D^2 \sigma_0 h / 2 \quad (6.19)$$

Bu ifadede;

- m, mermi kutlesini
- V_0 , hedefi delmek için merminin sahip olabileceği en duşuk hızı
- D, mermi çapını
- h, hedef kalınlığını
- σ_0 , hedef malzeme için dayanım değerini belirtir.

Woodward'ın yaklaşımında bağlıl gerilmelerin etkisi hesaba katılmamıştır. Bu nedenle sunek malzemeler için çok uygun sonuçlar verirken gevrek malzemelerde aynı oranda başarılı değildir. Yapılan çalışmada bulunan balistik sınır kalınlıkları, Woodward modelinde de hesaplanmıştır ve deneysel sonuçlarla teorik arasında yaklaşık %60'lık bir uyum soz konusudur. Aluminyum numunelerde ise ilgisiz sonuçlar vermiştir. Bu nedenle Woodward geliştirilmiş yontemi olan Thompson modeli incelenmiştir.

6.5. Thompson Modeli

Thompson, Woodward modelini bağlıl gerilmelerin etkisini de hesaba katarak genişletmiştir. Ortaya koyduğu analitik yaklaşım merminin bağlıl hızı için;

$$V_r^2 = V_0^2 - \frac{4\pi r_p^2 h_0}{m_p} \left[\frac{\sigma_y}{2} + \frac{V_0^2}{3} \right] \quad \text{İfadesini} \quad (6.20)$$

Delinme için gerekli olan enerji miktarı için ise;

$$E_c = \pi r_p^2 h_0 \left(0,5\sigma_y + A\rho \left(\frac{V_0 r_p}{L_n} \right)^2 \right) \quad \text{ifadesini} \quad (6.21)$$

bulmuştur.

Bu ifadelerde;

- V_r ; merminin bağıl hızı,
- V_0 ; merminin giriş hızı,
- r_p ; Merminin yarıçapını,
- h_o ; Hedefin kalınlığını,
- m_p ; Merminin kütesini,
- σ_y ; Hedef malzemesinin akma dayanımını
- A; Mermi şekline bağlı bir sabiti (konik için 1 ve yumru için 1,86)
- L_n ; Merminin uzunluğunu belirtir.

Yapılan bu çalışmalarda çıkış hızı ölçümlerinde yaşanan sıkıntılar nedeniyle bağıl hızı değil tam korumanın sağlandığı hedef kalınlığı analitik modelde hesaplanmıştır.

6.6. Übeyli ve Demir Modeli

Thompson modelinde göz ardı edilen en önemli etmen malzemenin tokluk ve sünekliğinin bir göstergesi olan yüzde uzama değerleridir. Bu bakımdan geliştirilen analitik modelde Thompson modeline benzer şekilde bir T kalınlığı hesaplanmıştır. Yalnız bu modelde T kalınlığı hesaplanırken akma dayanımı değil çekme dayanımı değerleri kullanılmıştır. Daha sonra süneklik ve tokluğun bir göstergesi olan yüzde uzama değerlerinden faydalanılarak bir T kalınlığına bir düzenleme yapılmıştır. Modeli açıklamak gerekirse;

$$T = \frac{\left(\frac{1}{2}m_p V_0^2\right)/36}{\pi r_p^2 \left(0,5\sigma_\xi + A\rho \left(\frac{V_0 r_p}{L_n}\right)^2\right)} \quad (6.22)$$

$$h_0 = ((100 - (\varepsilon \cdot u)) / 100) T \quad (6.23)$$

Bu ifadede;

V_0 ; merminin giriş hızı,

r_p ; Merminin yarıçapını,

h_0 ; Balistik tam koruma sağlayan hedef kalınlığını,

m_p ; Merminin kütesini,

σ_ξ ; Hedef malzemesinin akma dayanımını

A; Mermi şekline bağlı bir sabiti (konik için 1 ve yumru için 1,86)

L_n ; Merminin uzunluğunu

T; Hesaplanan kalınlık ön değerini,

ε ; Hedefin % süneklik değerini,

u; Sünekliğe bağlı bir sabiti, (%süneklik 13'den büyükse, u=2, küçükse u=3 alınır.) ifade

eder.

Bu modelde Thompson modeline benzer şekilde ancak akma dayanımı yerine çekme dayanımı kullanılarak bir kalınlık Denklem 6.22 kullanılarak hesaplanır. Bu kalınlığa kalınlık ön değeri (T) denir. Daha sonra kalınlık ön değerine %uzama dolayısıyla tokluk değeri hesaba katılarak Denklem 6.23'de verildiği gibi bir düzeltme yapılır. Böylece balistik tam korumayı hem sünek şekilde delinen hem de gevrek kırılan numuneler için sağlayan kalınlık değeri (h_0) bulunur. Bu modele uygun şekilde tüm numune grupları için balistik tam koruma sağlayan kalınlıklar hesaplanmıştır. Benzer şekilde Thompson ve Woodward modelleri için de hesaplamalar yapılmıştır. Bu hesaplamalar Çizelge 6.1'de sunulmuştur.

Çizelge 6.1. Balistik olarak tam korumayı sağlayan kalınlıkların ve modellerde hesaplanan kalınlıkların tüm numune gruplarına göre gösterimi.

Numune Grubu	Deneysel Sonuç (mm)	Woodward Modeli (mm)	Thompson Modeli (mm)	Übeyli ve Demir Modeli (mm)
0A	-	50,8	41	22,4
1A	14,4*	28,7	26	14,32
1B	-	26,4	24	14,6
1C	12,1	23,5	22,3	12,07
1D	14,4	22	21	13,96
2A	12,1 (%60)**	27,5	25,4	12,84
2B	9	25,4	23,8	12,1
2C	10,8	23,5	22,3	11,6
2D	10,8	21,3	20,4	11,2
3A	12,1	27,5	25,4	12,7
3B	-	25,4	23,8	14,34
3C	14,4 (%20)**	22,7	21,7	14,6
3D	14,4 (%60)**	20,6	19,9	14,14
5A	-	173	85	46
6A	-	314	105	51
6B	30	66	49	30,28
6C	35	75,9	54	36,3

*Numune 14,4 mm kalınlıkta mermi delmiş ve saplanıp kalmıştır. Mermi burnu arka yüzden çıkmış ancak mermi yoluna devam edememiştir.

**Parantez içinde verilen değerler numunenin 5 atış üzerinde % kaç başarılı olduğunu gösterir.

Balistik korumanın sağlandığı kalınlıklar göz önünde bulundurulduğunda Übeyli ve Demir modeli balistik olarak tam koruma sağlayabilecek kalınlığı sünek ve gevrek tüm numuneler için ~%95–99 hassasiyette belirleyebilmektedir. Diğer modellerle olan karşılaştırılması Çizelge 6.1’de ayrıntılı olarak gösterilmiştir. Woodward modeli göreceli olarak çeliklerin sünek olanlarında gevrek olanlara göre ve alüminyuma göre daha anlamlı sonuçlar verirken deneysel sonuçlarla %60 gibi bir uyum içerisinde. Thompson modelinde de sünek malzemeler göreceli olarak deneysel daha yakın sonuçlar vermiştir. Fakat bu modelde gevrek numunelerde oldukça ilgisiz sonuçlar elde edilmiştir. Bu durumun temel nedeni tokluk değerinin göz ardı edilmesinden kaynaklanmaktadır. Dayanım ve sertlik balistik başarımları

açısından çok önemli etmenlerdir. Ancak yüksek sertlik ve dayanım değerlerinde numunelerin toklukları oldukça düşüktür. Bu durum numunelerin mermiyi durdurmasına karşın ani şekilde kırılmalarına neden olmaktadır. Übeyli ve Demir modelinde ise Thompson modelinde yapılan küçük bir değişiklikle bir ön kalınlık değeri hesaplanır ve bu değer tokluğun bir ifadesi olan % uzama değerinin hesaba katıldığı bir düzeltmeye uğrayarak tam balistik koruma sağlayan kalınlığı ifade eder.

BÖLÜM 7

7. SAYISAL BENZETİM ÇALIŞMALARI

Bu bölümde proje için yapılan deneysel çalışmalardan yararlanarak sayısal benzetim çalışmaları yapılmış ve bu benzetimlerin deneylerle uyumluluğu incelenmiştir. Benzetim çalışmalarında, ticari bir hidrokod yazılımı olan Ansys AUTODYN kullanılmıştır. Yazılım; problemlerin çözümü için açık zaman integrasyonu (explicit time integration) kullanan bir sonlu elemanlar analiz yazılımıdır.

Yapılan çalışmalar çerçevesinde oluşturulan malzeme modellerindeki parametrelerin değerleri literatürden derlenmiştir. Bazı sertlik değerleri için malzeme modeli oluşturacak değerlerin literatürden bulunması mümkün olmadığından bu plakalar ait sayısal benzetimler yapılamamıştır. Bu malzemeler için malzeme modeli oluşturulması ya da malzeme modeli parametrelerinin bulunması bu proje kapsamına alınmamıştır. Bu tür parametrelerin bulunması özel ve gelişmiş deney yöntemleri ile (Split Hopkinson Pressure Bar gibi) mümkündür, ancak bu parametrelerin tespit edildiği deneylerin çok pahalı ve zahmetli olması ve proje teklif aşamasında ve başlangıcında Türkiye’de bu olanakların bulunmaması nedeniyle malzeme modeli çalışmaları proje teklifinde yer almamıştır. Ancak proje ekibinin konu ile ilgili geçmiş deneyimi ve literatürden bulunan parametreler kullanılarak benzetimler yapılmış ve deney neticeleriyle karşılaştırılmıştır.

7.1. Teori

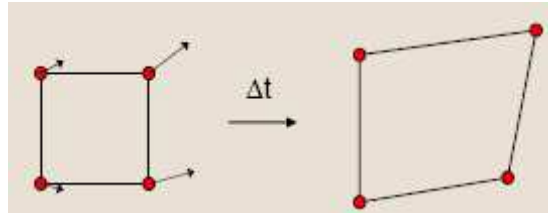
Sayısal benzetimlerde, kullanılan malzemeyi doğru bir şekilde modellemek için yazılımdaki çözücünün çalışma mantığı incelenmiştir.

Sayısal benzetimlerde, mermi ve plakanın çarpışmasının çözdürülmesi için her iki parça da lagrange elemanları ile modellenmiştir. Yazılımdaki lagrange-lagrange teması sağlanmıştır. Yazılım açık zaman integrasyonu ile çözümleme yaptığından her bir çevrimin hesaplarını yaparken bir önceki çevrimin verilerini kullanır.

7.1.1. Lagrange Çözücüsü

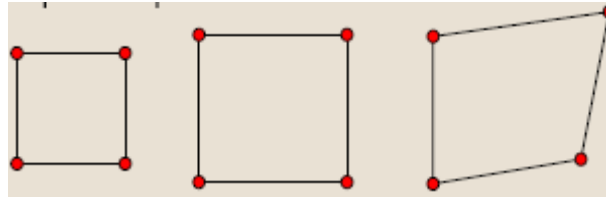
AUTODYN-3D de yer alan lagrange çözücüsünün çalışma aşamaları şu şekilde gösterilebilir.

- Çevrimin başında, her bir düğüme ilişkin olan hızlarla birim zamanda integrasyon yapılarak yeni düğüm konumları bulunur.
- Yeni düğüm noktalarından, yeni hücre yoğunlukları ve hücre gerinim hızları hesaplanır.



Şekil 7.1.1.1. Hücre Şekil Değiştirmesi

- Hesaplanan gerinimlerden yeni gerilmeler hesaplanır.
- Hücre şekil değiştirmesi birbirinden bağımsız iki parçaya ayrılır.



Şekil 7.1.1.2. Eski hücre> hacimdeki değişiklik + şekildeki değişiklik

- Hacimdeki değişiklik küresel simetrik bir gerilmeye yol açar, buna hacimsel gerilim ya da basınç denir.
- Şekilsel değişiklik sapma gerilimi oluşumuna yol açar (deviatoric stress field).
- Hacimsel gerilim ya da basınç, hal denklemi (EOS) tarafından kontrol edilir.
- Sapma gerilmeleri, Hooke kanunu (elastik) ve bir plastik akma kriteri (bünye denklemi-constitutive relation) tarafından kontrol edilir ve yazılımda “dayanım modeli” (strength model) olarak geçer.
- Kırılma kriteri ile birlikte malzeme modellenmesi tamamlanmış olur.
- Bir hücrenin içsel gerilme durumu hesaplandığı zaman her bir düğüme etkiyen yük miktarları bulunur.
- Bu aşamada, varsa sınır koşullarından ya da etkileşimlerden gelen dış yükler de eklenerek düğümlerin son yükleri bulunur.

- Dügüm yükleri kullanılarak düğümlerin ivmeleri hesaplanır.
- Dügüm ivmelerinin zaman integrasyonu yeni dügüm hızlarını verir.
- Bu şekilde tamamlanan hesaplama çevrimi önceden belirlenen bir zamana ya da çevrim sayısına ulaşana dek tekrarlanır.

Lagrange çözücüsünün kullandığı ana denklemler şu şekilde sıralanabilir. Kütlenin korunumu, momentumun korunumu ve enerjinin korunumu ile ilgili parçalı diferansiyel denklemler lagrange koordinatlarında ifade edilir. Bu denklemler malzeme modeli ve sınır koşulları ile birlikte sayısal benzetimin çözümünde kullanılır. Lagrange bölgesinde tanımlanan malzeme herhangi bir bozulma/deformasyon sırasında o bölgede kalır. Böylece lagrange ağı içindeki malzeme ile birlikte hareket eder ve bozulur; böylece kütlenin korunumu sağlanmış olur. Yoğunluk ise bölgenin güncel hacmi ve ilk kütlesi kullanılarak hesaplanır.

$$\rho = \frac{\rho_0 V_0}{V} = \frac{m}{V} \quad (7.1.1.1)$$

Momentumun korunumunu sağlayan parçalı diferansiyel denklemler ivme ile gerilim tensörü σ_{ij} arasında bağıntı kurar.

$$\begin{aligned} \rho \ddot{x} &= \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z} \\ \rho \ddot{y} &= \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial z} \\ \rho \ddot{z} &= \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} \end{aligned} \quad (7.1.1.2)$$

Gerilme tensörü hidrostatik p ve sapma s bileşenlerine ayrılır. Buradaki q bileşeni örgüye etkileyen sözde-akışkansı (pseudo viscous) kuvvet bileşenidir.

$$\begin{aligned}
\sigma_{xx} &= -(p+q) + s_{xx} \\
\sigma_{yy} &= -(p+q) + s_{yy} \\
\sigma_{zz} &= -(p+q) + s_{zz} \\
\sigma_{xy} &= s_{xy} \\
\sigma_{yz} &= s_{yz} \\
\sigma_{zx} &= s_{zx}
\end{aligned}
\tag{7.1.1.3}$$

Gerinim tensörü ϵ_{ij} ise gerinim hızları ve hızlardan bulunur.

$$\begin{aligned}
\dot{\epsilon}_{xx} &= \frac{\partial \dot{x}}{\partial x} \\
\dot{\epsilon}_{yy} &= \frac{\partial \dot{y}}{\partial y} \\
\dot{\epsilon}_{zz} &= \frac{\partial \dot{z}}{\partial z} \\
\dot{\epsilon}_{xy} &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \dot{x}}{\partial y} + \frac{\partial \dot{y}}{\partial x} \right) \\
\dot{\epsilon}_{yz} &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \dot{y}}{\partial z} + \frac{\partial \dot{z}}{\partial y} \right) \\
\dot{\epsilon}_{zx} &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \dot{z}}{\partial x} + \frac{\partial \dot{x}}{\partial z} \right)
\end{aligned}
\tag{7.1.1.4}$$

ve bu gerinim hızları ile hacim değişimi arasında şu bağıntı kurulur

$$\frac{\dot{V}}{V} = \dot{\epsilon}_{xx} + \dot{\epsilon}_{yy} + \dot{\epsilon}_{zz}
\tag{7.1.1.5}$$

Bu denklem ve Hooke kanunu kullanılarak sapma gerilmeleri ve gerinim hızları arasındaki şu bağıntı bulunur

$$\begin{aligned}
\dot{s}_{xx} &= 2G(\dot{\epsilon}_{xx} - \frac{1}{3}\dot{V}) \\
\dot{s}_{yy} &= 2G(\dot{\epsilon}_{yy} - \frac{1}{3}\dot{V}) \\
\dot{s}_{zz} &= 2G(\dot{\epsilon}_{zz} - \frac{1}{3}\dot{V}) \\
\dot{s}_{xy} &= 2G\dot{\epsilon}_{xy} \\
\dot{s}_{yz} &= 2G\dot{\epsilon}_{yz} \\
\dot{s}_{zx} &= 2G\dot{\epsilon}_{zx}
\end{aligned} \tag{7.1.1.6}$$

Buradaki sapma gerilmeleri katı kütle dönmeleri, plastik akma, hasar ve kırılma gibi gerçek etkilere yol açan gerilme bileşenleridir.

Basınç p ve yoğunluk ρ ve içsel özgül enerji e arasındaki bağıntı hal denklemi ile kurulur

$$p = f(\rho, e) \tag{7.1.1.7}$$

ve bu bağıntı enerji korunumu denklemi ile birlikte çözülür.

$$\dot{e} = \frac{1}{\rho} (\sigma_{xx}\dot{\epsilon}_{xx} + \sigma_{yy}\dot{\epsilon}_{yy} + \sigma_{zz}\dot{\epsilon}_{zz} + 2\sigma_{xy}\dot{\epsilon}_{xy} + 2\sigma_{yz}\dot{\epsilon}_{yz} + 2\sigma_{zx}\dot{\epsilon}_{zx}) \tag{7.1.1.8}$$

Gerilme tensörünün sapma ve hacimsel gerilim bileşenlerine ayrılması malzeme modelleme kısmında verilecektir.

7.1.2. Malzeme Modeli

Kararsız malzeme akışını tanımlamak için kullanılan parçalı diferansiyel denklemler (kütle, momentum ve enerjinin korunumu) problemi çözmek için yeterli değildir. Gerilim ve gerilim gibi akış değişkenleri arasındaki ilişkiyi tanımlayabilmek için daha fazla bağıntıya ihtiyacımız vardır. İşte bu bağıntı, gerilim ve bozulma/deformasyonla içsel enerji arasındaki ilişkiden doğan malzeme modelidir.

Şu an ele almakta olduğumuz durum dahil birçok durumda; gerilme tensörünü hidrostatik basınç (üç normal gerilme de eşit olarak) ve sapma gerilimi tensörü bileşenine ayırabiliriz. Sapma gerilimi, malzemenin şekil değiştirmesi ile ilintilidir. Malzemenin kırılmasına kadar olan süreçte sapma gerilimi tensörü etkinken yerel özkütle ve yerel özgül enerji hidrostatik basınç tarafından kontrol edilir. Bu ilişkiyi tanımlayan hal denklemdir (EOS).

Malzemenin bir noktadaki gerilimi ve gerinim arasındaki bağıntı Hooke kanunuyla ifade edilmiştir. Artımsal bir gerinim için artımsal bir gerilme şu şekilde yazılabilir

$$\dot{\sigma}_i = \lambda \left(\frac{\dot{V}}{V} \right) + 2G \dot{\epsilon}_i \quad i = 1,2,3 \quad (7.1.2.1)$$

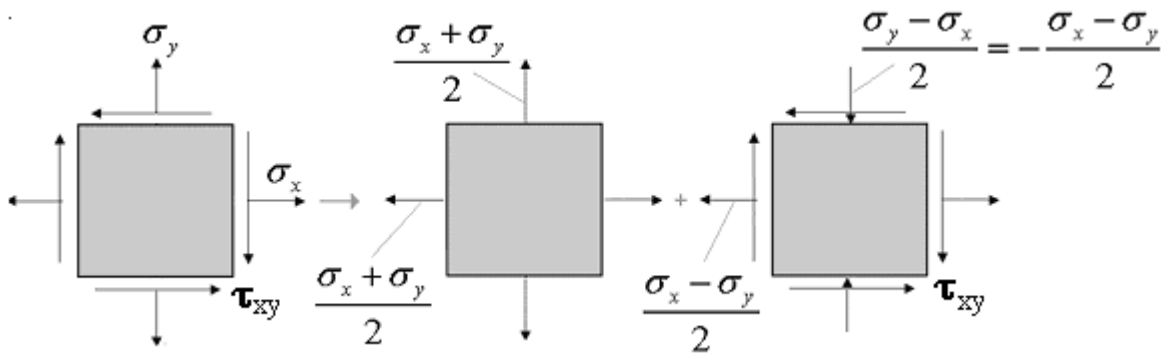
Buradaki λ ve G Lamé sabitleri olarak bilinir. Herbir gerilmeyi hidrostatik bileşen p ve sapma bileşeni s olarak tanımlarsak, p asal gerilmelerin (negatif) ortalaması olur

$$p = -\frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \quad (7.1.2.2)$$

ve

$$\begin{aligned} \sigma_i &= -p + s_i \\ \dot{\sigma}_i &= -\dot{p} + \dot{s}_i \quad i = 1,2,3 \end{aligned} \quad (7.1.2.3)$$

Bu denklemler iki boyutlu bir durum için şu şekilde görselleştirilebilir:



Şekil 7.1.2.1. İki boyutlu bir hücre; toplam gerilim gerilim > hidrostatik gerilim + sapma gerilimi

7.1.3. Hal Denklemi (EOS)

Kullanılan malzemelerin hal/durum denklemleri modellenirken yazılımdaki lineer hal denklemi kullanılmıştır.

İdeal gaz denkleminde göre p , özgül hacim v ve özgül entropinin S 'nin fonksiyonudur. Fakat çoğu durumda, eğer malzeme sıvı ya da katı ise entropideki değişiklikler küçük olacağından ihmal edilebilir ve p sadece özkütlenin fonksiyonu olarak düşünülebilir. Böylece

$$p = K\mu \quad (7.1.3.1)$$

olarak, $\mu=(\rho/\rho_0) - 1$ ve K 'de malzemenin hacim (bulk) modülüdür. Bu formülün yüksek basınçlar için geçerliliğini kaybedeceği unutulmamalıdır.

Kullanılan malzemelerin katsayıları Çizelge 7.1.3.1'de verilmiştir.

Çizelge 7.1.3.1. Malzeme özellikleri (hal denklemi)

100Cr6 çeliği (çekirdek)	
Referans yoğunluğu	7853 kg/m ³
Hacim modülü	169 GPa
Fişek pirinci (kılıf)	
Referans yoğunluğu	8530 kg/m ³
Hacim modülü	117 GPa
Antimon kurşun (burun)	
Referans yoğunluğu	10740 kg/m ³
Hacim modülü	46 GPa
AISI 4340	
Referans yoğunluğu	7830 kg/m ³
Hacim modülü	159 GPa

7.1.4. Dayanım ve Kırılma Modeli

Balistik delinme ile ilgili çeşitli olguları tanımlayabilmek için malzemelerin darbe altında yüksek gerinim hızları sonucundaki davranışlarını anlamak gerekir. Bu tanımlama yalnızca malzemenin yüksek gerinimlerdeki gerilme-gerinim davranışını içermez. Farklı gerinim hızlarını (strain rate) ve sıcaklıkları, ayrıca hasar (damage) oluşumunu ve kırılma kipini (fracture mode) içerir. Kırılmayı (fracture) da içeren bu derece karmaşık bir davranışı analitik modellerde tanımlamak zordur. Sayısal benzetimlerde, herhangi bir karmaşıklıkta bir bünye (constitutive) modeli kodun içine aktarılabilir. Fakat, dinamik malzeme dayanımındaki model sabitlerini elde etmedeki zorluklardan dolayı mühendislik modelleri daha karmaşık yapıda olan diğer modellere tercih edilir. Diğer bir önemli nokta ise plastik akma ve kırılma arasındaki farktır. Sünek malzemelerde plastik akım makro boyutta şekil değişimi, mikro boyutta kayma hatları (slip lines) ve de atomsal boyutta bozukluklar (dislocation) olarak görülebilir. Plastik akmanın sebebinin sapma gerilmeleri (deviatoric stress) olduğu bilinir. Hasarın başlangıcını teşkil edenler ise bozulmaların mikro-kusurlar veya mikro-gerilme yoğunlaşmaları tarafından durdurulması, bunun sonucunda ayrışma (decohesion) yaratılması ve akabinde çekirdeklenme (nucleation), mikro-kırık ve mikro-boşlukların büyümesi ve birleşmesidir [78]. Hasar ilerlemesi ise ağırlıklı olarak malzemedeki hidrostatik gerilme durumu tarafından etkilenir. Buna göre plastik akma ve kırılmayı modellemek için farklı modellemeler yapmak gerekmektedir.

Parçalarla ilgili malzemeler modellenirken Johnson–Cook (JC) modeli (Johnson and Cook, 1983) kullanılmıştır. Bu model tamamen ampiriktir

$$\sigma_y(\varepsilon_p, \dot{\varepsilon}, T) = \sigma_0 \left[1 + \frac{B}{\sigma_0} (\varepsilon_p)^n \right] [1 + C \ln(\dot{\varepsilon}^*)] [1 - (T^*)^m] \quad (7.1.4.1)$$

$$\dot{\varepsilon}^* = \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}; \quad T^* = \frac{(T - T_r)}{(T_m - T_r)}$$

σ_0 : sıfır plastik gerinimdeki akma gerilimi

B,C,n,m : malzeme sabitleri

$\dot{\varepsilon}_0$: referans gerinim hızı

T_r : referans sıcaklık

Aynı şekilde, kırılma gerinimi şu şekilde bulunur

$$\varepsilon_f = (D_1 + D_2 \exp(D_3 \sigma^*)) (1 + \varepsilon_{eq}^*)^{D_4} (1 + D_5 T^*) \quad (7.1.4.2)$$

D_1, \dots, D_5 testlerden elde edilen malzeme sabitleri ve $\sigma^* = \sigma_H / \sigma_{eq}$ gerilme 3-eksensellik oranıdır. Kırılma, malzeme elemanındaki hasar bire eşit olduğunda gerçekleşir, çünkü esas denklem ile hasar arasında bir bağıntı yoktur. Hasar (D) şu şekilde ifade edilir

$$D = \sum \frac{\Delta \varepsilon_{eq}}{\varepsilon_f} \leq D_c = 1 \quad (7.1.4.3)$$

$\Delta \varepsilon_{eq}$ birikmiş (eşlenik) plastik gerinimin artımıdır (increment). Bir elemandaki hasar miktarı kritik değere ulaştığı zaman ($D_c = 1$), eleman aşınma dolayısıyla yok olur. Bu model birçok balistik delinme probleminde iyi sonuç vermiştir [79].

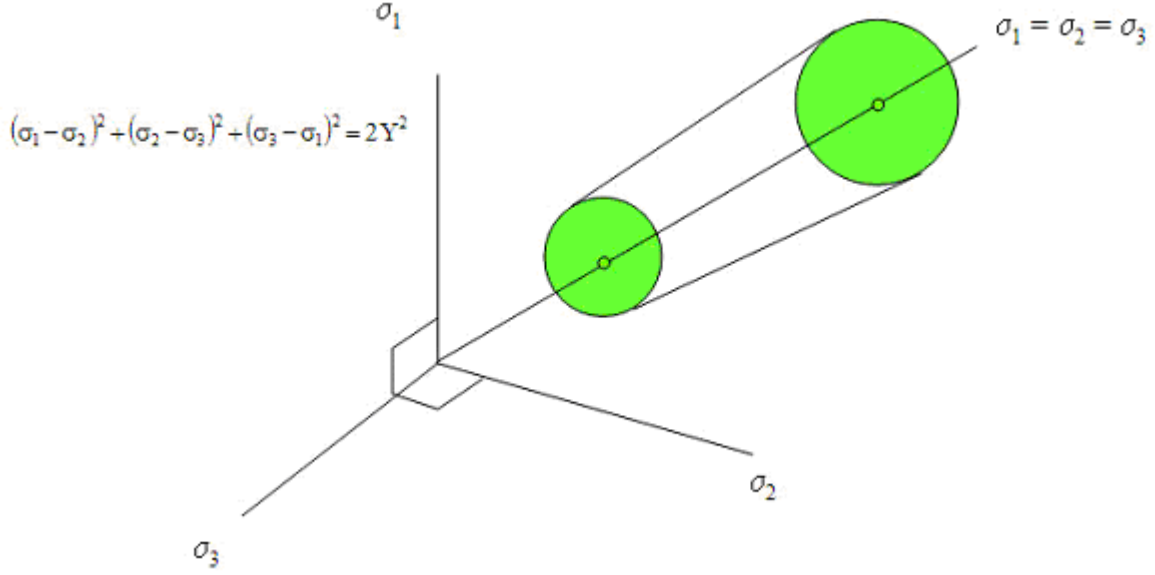
Kullanılan mermi çekirdeği malzemesinin Johnson-Cook parametreleri Çizelge 7.1.4.1'de verilmiştir [80]. Hedef malzemeleri için kullanılan dayanım ve kırılma modeli parametreleri, ilerleyen bölümlerde verilecektir.

Çizelge 7.1.4.1. Çekirdek için dayanım modeli sabitleri

100Cr6 çeliği (çekirdek)	
Kesme modülü	80 GPa
Akma gerilmesi σ_0 (A)	2033 MPa
Sertleşme sabiti (B)	895 MPa
Sertleşme üssü (n)	0,3
Gerinim hızı sabiti (C)	0,0095
Termal yumuşama üssü (m)	1,03
Ergime sıcaklığı	1793 K

Çekirdek malzemesi için hasar/kırılma modeli kullanılmamıştır.

Bunlara ek olarak, merminin kılıf ve burun malzemeleri için Von-Mises dayanım modeli kullanılmıştır.



Şekil 7.1.4.1. Von Mises gerilmeleri

Bu modelde akma dayanımının sabit bir değeri vardır ve bu dayanımı sağlayan yarıçap içinde kalan alan elastik olup dışında kalan alanlar plastiktir. Sayısal benzetimlerin gidişini fazla etkilemeyeceği için bu malzemeler için kırılma modeli kullanılmamıştır. Malzemelerin sabitleri Çizelge 7.1.4.2’de sunulmuştur.

Çizelge 7.1.4.2. Kılıf ve burun malzemeleri için dayanım modeli sabitleri

Fişek pirinci (kılıf)	
Kesme modülü	38 GPa
Akma gerilimi	112 MPa
Antimon kurşun (burun)	
Kesme modülü	56 GPa
Akma gerilimi	20 MPa

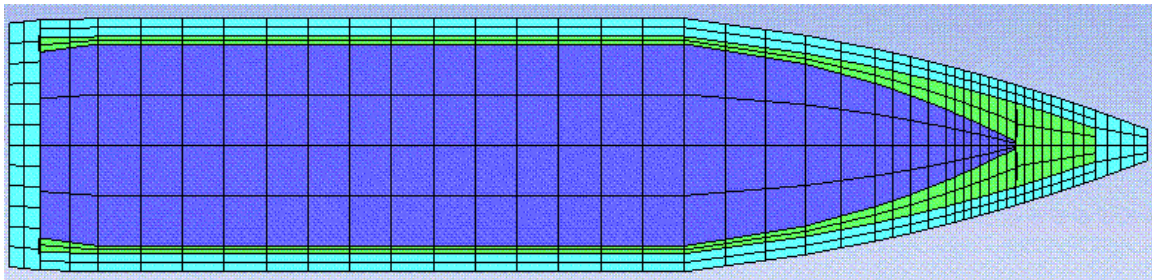
7.1.5. Aşınma Gerinimi

Analiz sırasında programın hata vermemesi için önemli olan bir diğer husus da aşınma geriniminin doğru tanımlanmasıdır. Kırılma modelinin yetersiz kalabileceği durumlar olduğu

gibi kırılma modelinin tanımlanmadığı parçaların da aşınma gerinimi tanımlanmasına ihtiyaç vardır. Fiziksel gerçekliğe dayanmasa da aşınma gerinimi olmadığı zaman, elemanlar çok fazla şekil değişimi/bozulmaya uğrayabilir. Kullanılan hidrokod, çevrimlerin zaman aşımalarını hesaplarken, bir gerilim dalgasının bir çevrimde en fazla bir eleman boyunca ilerlemesi gerektiği kuralından yola çıkarak, birim zamanı en küçük elemana göre hesaplamaktadır. Dolayısıyla elemanların fazla bozulmaya uğraması kullanılan zaman birimini küçültmekte ve hesaplamaları yavaşlatmaktadır. Hatta sonuçların ıraksamasına bile neden olabilmektedir. AUTODYN bu tür durumlarda “timestep too small” veya “degenerate cell” gibi hata mesajları ile kullanıcıyı bilgilendirmekte ve programı durdurmaktadır. Bu tür hatalarla karşılaşmamak için, yapılan benzetimlerde bütün malzemeler için aşınma gerinimi anlık geometrik gerinime göre 1,5 katına ulaştığında yok olacak şekilde modellenmiştir. Kullanılan aşınma gerinimi ile ilgili tartışma sonuçların ele alındığı bölümde yapılmıştır.

7.2. Hedef Modellenmesi ve Benzetimler

Benzetimlerde kullanılan mermi modeli (Şekil 7.2.1) ve parametreleri (Çizelge 7.1.4.1 ve 7.1.4.2) daha önce yapılmış bir doktora tezi çalışmasından [80] alınmıştır. Mermi hızı, tüm benzetimlerde tutarlı olmak adına 785 m/s olarak alınmıştır.



Şekil 7.2.1. Mermi Modeli

Mermi de hedef plakalar da 3 boyutlu, yarım simetrik olarak modellenmiştir. Kullanılan modellerde ise Y eksenini simetri düzleminin hedef içine doğru olan normaline, Z eksenini mermi istikametinin tersine ve X eksenini ise kalan üçüncü eksene tekabül etmektedir. Parçalar modellenirken sadece pozitif Y ekseninde modelleme yapılmış, simetri gereği aynı modelin negatif Y ekseninde de var olduğu kabul edilmiştir.

7.2.1. AISI 1050

28 HRC sertliğe sahip olan AISI 1050 (raporda bu malzeme **0A** kodu ile tanımlanmıştır) çeliği için yazılımda kurulmuş malzeme modeli olmadığı ve literatürde de sayısal benzetim çalışmaları için kullanılmamış olduğundan basit bir malzeme modeli kurulup benzetim yapılmıştır.

Hal denklemi için bu tür çalışmalarda sıklıkla kullanılan doğrusal (linear) hal denklemi kullanılmıştır. Literatürden ve çeşitli kaynaklardan toplanılan malzeme verileri ışığında hal denklemi oluşturulmuştur.

Dayanım ve kırılma modelleri için yapılan literatür taramasında dinamik koşullar için akış gerilmesini (flow stress) ve kırılmayı (failure) modelleyebilecek veriler bulunamamıştır. Bunun için yazılım bünyesinde olan daha basit modeller incelenerek von Mises dayanım denklemi ve sabit plastik gerinime dayalı kırılma modelleri kullanılmıştır.

Shigley et al'ın sağladığı tablolara [81] göre elastisite modülü E ve Poisson oranı ν , 207 GPa ve 0.3'tür. Hacim (bulk) modülü K ve kesme modülü μ için

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)} \quad (7.2.1.1)$$

ve

$$\mu = \frac{E}{2+2\nu} \quad (7.2.1.2)$$

(7.2.1.1) ve (7.2.1.2) kullanılarak hacim ve kesme modülleri hesaplanmıştır.

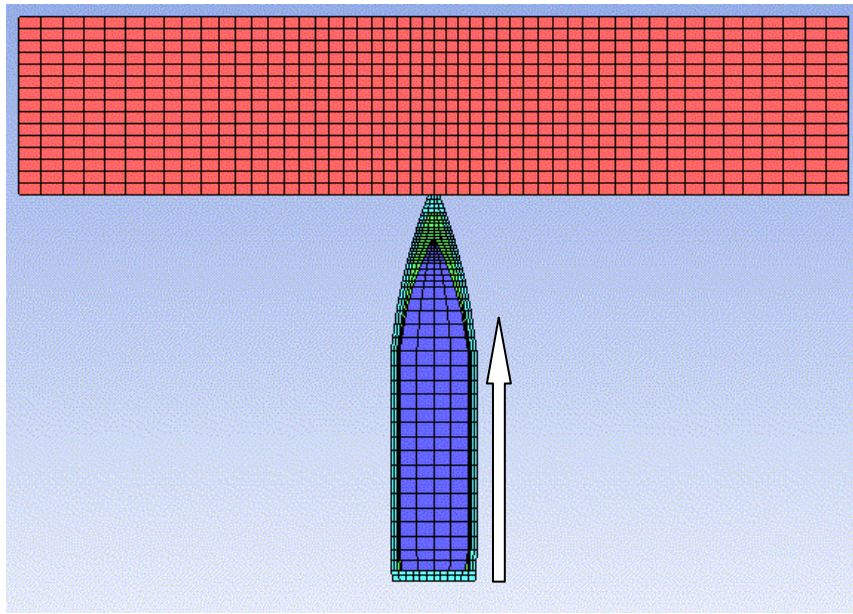
Çizelge 7.2.1.2'de malzeme modelinde kullanılan veriler gösterilmiştir.

DeneySEL çalışmalarda belirtildiği gibi, 0A malzemesinin tüm alan yoğunluklarındaki numuneleri sünek bir şekilde delinmiştir. Bundan dolayı, 0A malzemesi için beşinci alan yoğunluğunun sayısal benzetimi yapılmıştır. Plaka kalınlığı 15mm'ye yuvarlanmıştır. 70mmx70mm'lik plakanın yarısı modellenmiş, kenarlar tüm serbestlik derecelerinden kısıtlanarak kelepçelenmiştir. Mermi modelinde kullanılan elemanlara boyutça yakın olacak şekilde kalınlık boyunca 15 eleman kullanılmıştır. Y eksenini boyunca toplam 25 ve X eksenini

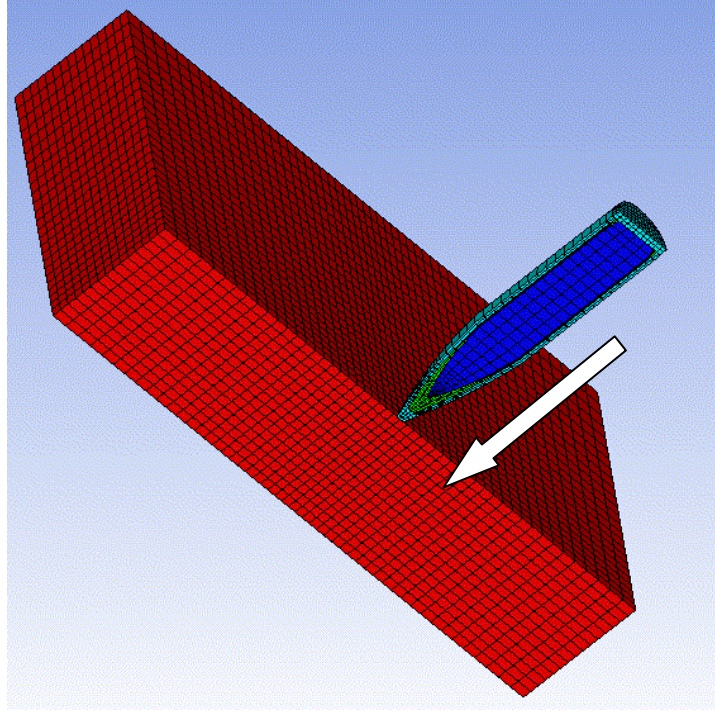
boyunca ise toplam 50 eleman kullanılmıştır. Merminin çarptığı bölgede daha ince örgü yapısı oluşması için Y ekseninin başladığı yerde 2 tane 1mm'lik eleman kullanılmıştır. Aynı durum X eksenini için de geçerlidir.

Çizelge 7.2.1.2 AISI 1050 çeliği için malzeme modeli verileri

Doğrusal Hal Denklemi	
Referans yoğunluğu	7833 kg/m ³
Hacim modülü	172,5 GPa
Özısı	465 J/(kg.K) [82]
Termal iletkenlik	54 W/(m.K) [83]
von Mises Dayanım Denklemi	
Kesme modülü	79,62 GPa
Akma gerilmesi	636 MPa
Sabit Gerinimli Kırılma Modeli	
Kırılma gerinimi	0,15

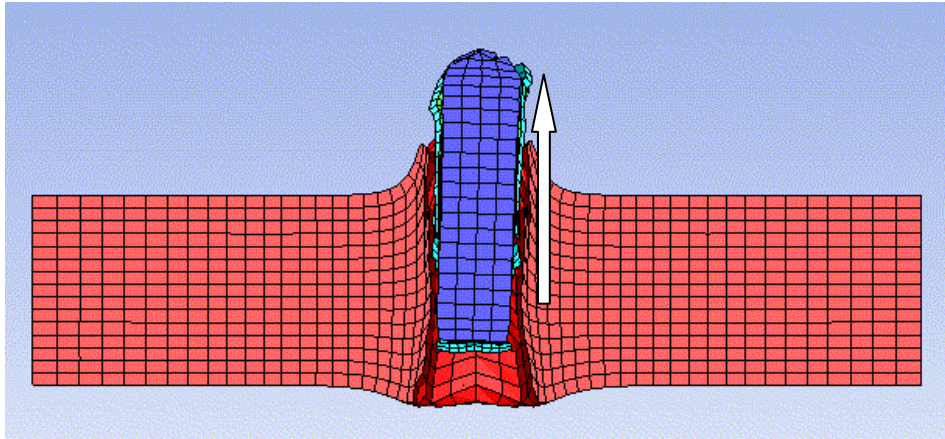


Şekil 7.2.1.1. Mermi ve plakanın çarpma anındaki modelleri

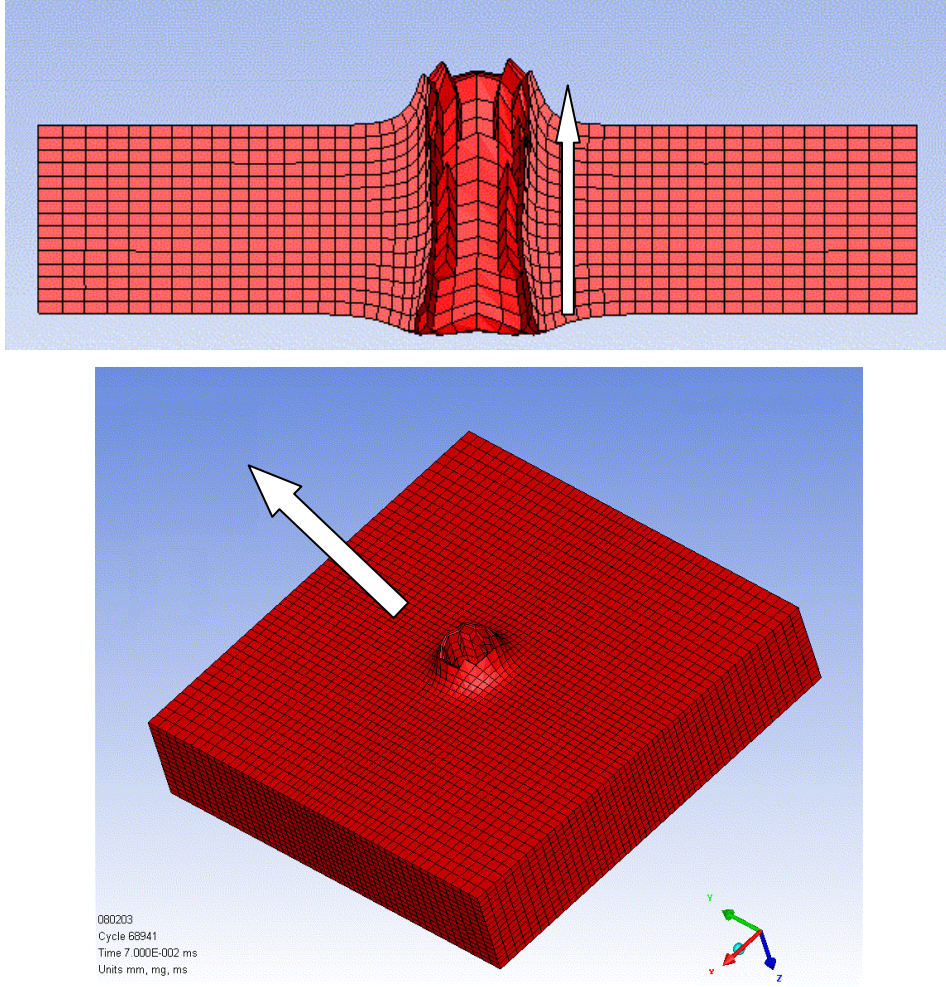


Şekil 7.2.1.2. Mermi ve plakanın çarpma anındaki modelleri

Benzetim **0,07 ms** süresince devam ettirilmiş ve mermi yaklaşık **340 m/s**'lik bir artık hızla plakayı delip geçmiştir. Mermi çıkış hızı, deneysel verilere (ortalama 300 m/s) çok yakındır. Çıkış anında mermi ve plakanın durumu, plakanın benzetim sonrası görüntüleri Şekil 7.2.1.3 ve 7.2.1.4'te verilmiştir.



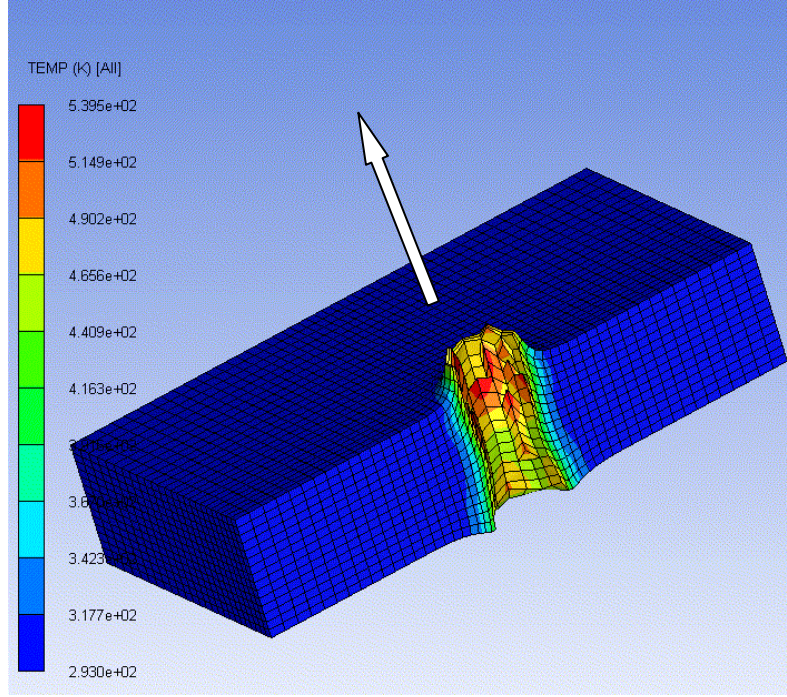
Şekil 7.2.1.3. Benzetim sonunda mermi ve plaka



Şekil 7.2.1.4. Plakanın son hali (kesit) ve plakanın arka yüzü

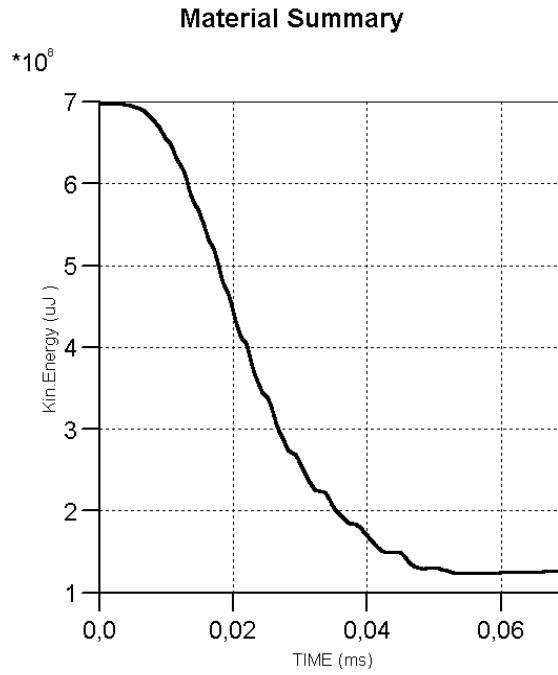
Yukarıdaki şekillerde görüldüğü gibi plaka sünek bir şekilde delinmiş, merminin çıkışı yönünde tepecik oluşmuştur. Bu durum deneysel sonuçlarla benzerlik göstermektedir.

Kullanılan malzeme modellerinin karakterini etkileyen etmenlerden biri de sıcaklıktır. Darbe esnasında malzemenin sıcaklığı belirli bir sıcaklığın üzerine çıkarsa malzeme parametrelerinde değişiklik yapmak gerekebilir. Fakat bu çalışmada üzerinde durulan malzemeler hedef plaka malzemeleri olup yapılan benzetimler sonucunda plaka sıcaklığında benzetim sonuçlarını etkileyecek miktarda değişiklik görülmemiştir (Şekil 7.2.1.5). Merminin sıcaklığı uç bölgelerde aşırı miktarda artsa da malzeme modelinde bu olgu için bir değişiklik yapılmasına gerek görülmemiştir. Zira benzetim sonuçları ile deney sonuçlarının yakınlığı, bu varsayımların yanlış olmadığına işarettir.



Şekil 7.2.1.5. Plakanın benzetim sonundaki sıcaklık dağılımı

Merminin kinetik enerji bilançosu incelendiğinde, delme işleminin büyük bir kısmının ilk 0,04 ms'de gerçekleştiği ve bu süre içerisinde merminin kinetik enerjisinin %80'inin harcandığı görülür.



Şekil 7.2.1.6. Merminin kinetik enerji bilançosu (çekirdek malzemesi olan 100Cr6 esas alınmıştır)

7.2.2. AISI 4140

Deneysel atışlar için numuneler hazırlanırken, aynı sertlik değeri için daha yüksek dayanım elde etmek adına birinci grup numuneler (AISI 4140) (**1A**, **1B**, **1C** ve **1D** grup elemanlar olarak tanımlanmıştır) özel bir ısıtıl işleminden geçirilmiştir. Bu ısıtıl işlemle ve sonuçlarıyla ilgili veriler raporun deneysel çalışmalar kısmında ayrıntılı olarak sunulmuştur. Örneğin 40 HRC sertlik değerindeki AISI 4140 malzemesi için piyasada sıklıkla karşılaşılan akma gerilmesi değeri yaklaşık olarak 600 MPa civarındadır [84][85][86]. Ancak deneysel çalışmalar için kullanılan 40 HRC sertlik değerindeki AISI 4140 malzemesinin, yapılan özel ısıtıl işlemler sonucunda yaklaşık 1150 MPa akma gerilmesi değerine ulaşması sağlanmıştır. Bu değer, malzemenin mermi çarpması durumundaki dinamik davranışını son derece olumlu yönde etkilemiş, ancak bilgisayarlı benzetimlerinin yapılmasını, malzeme parametrelerinin bilinmemesi nedeniyle, olanaksız kılmıştır. Bu özel üretim malzeme için dinamik malzeme parametrelerini yayınlanmış makaleler içinde bulmak da mümkün olmamıştır. Bu benzetimlerin sağlıklı bir şekilde yapılabilmesinin tek yolu, gerekli dinamik malzeme testlerinin (örneğin “Split Hopkinson Pressure Bar” Testi) yapılması ve sonucunda bu özel malzeme için gerekli dinamik malzeme parametrelerinin elde edilmesidir. Geçmişte (proje teklifi aşamasında ve ilk iki yılı içinde) bu tür testlerin yapılmasına yönelik altyapının Türkiye’de bulunmaması ve test maliyetinin de çok yüksek olması nedenleriyle bu testlerin proje kapsamında gerçekleştirilmesi olanaksız olduğundan ilgili benzetimlerin de yapılması mümkün olamamıştır.

7.2.3. AISI 4340

Kullanılan hidrokod yazılımı, kütüphanesinde AISI 4340 çeliği (**2A**, **2B**, **2C** ve **2D** olarak tanımlanmıştır) için dayanım (Johnson ve Cook) ve hal denklemlerini (doğrusal hal denklemi) barındırmaktadır. Ancak bu çeliğin ısıtıl işleme maruz bırakılmış halleri için gerekli dayanım modeli parametreleri kütüphanede mevcut değildir. Bu parametreler için daha önce yayınlanmış bir makaleden yardım alınmıştır [87].

Johnson ve Cook dayanım modeli, tamamen ampiriktir ve aşağıdaki formdadır:

$$\sigma_y(\epsilon_p, \dot{\epsilon}, T) = \sigma_0 \left[1 + \frac{B}{\sigma_0} (\epsilon_p)^n \right] [1 + C \ln(\dot{\epsilon}^*)] [1 - (T^*)^m]$$

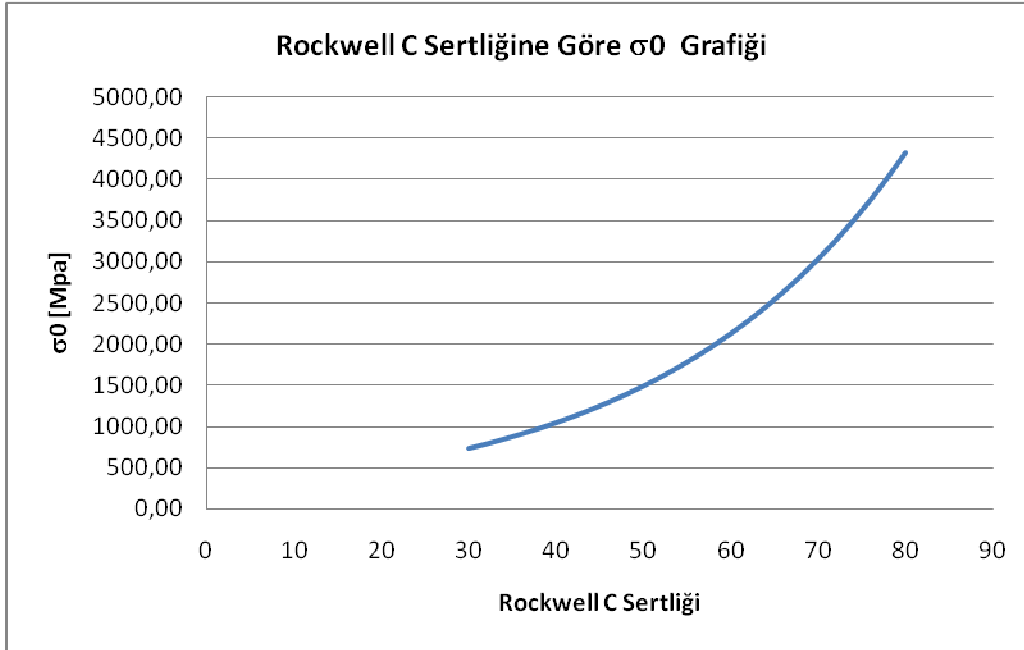
$$\dot{\epsilon}^* = \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0}; \quad T^* = \frac{(T - T_r)}{(T_m - T_r)}$$
(7.2.3.1)

Burada σ_0 , sıfır plastik gerinimdeki akma gerilmesi ve B, C, n ve m de malzeme parametreleridir. $\dot{\epsilon}_0$ referans gerinim hızı olup T_r ise referans sıcaklıktır.

AISI 4340 çeliği için σ_0 parametresinin değeri, malzemenin temperlenmesi sonucu elde edilen sertliğine göre değişmektedir. Bahsi geçen makalede [87] yazarlar malzemenin sertlik değerine (R_c) bağımlı olarak σ_0 değerini bulan üstel bir denklem belirlemişlerdir.

$$\sigma_0 = \exp (A_1.R_c + A_2) \text{ [MPa]}$$
(7.2.3.2)

Burada $A_1 = 0,0355 \ln(\text{MPa})$, $A_2 = 5,5312 \ln(\text{MPa})$ ve R_c ise malzemenin Rockwell C sertliğidir.



Şekil 7.2.3.1. AISI 4340 Çeliğinin Farklı Temperleri İçin σ_0 Değerinin Rockwell C Sertlik Değerine Göre Değişimi

Bununla birlikte B/σ_0 oranı da tüm temperler için sabit ve 0,6339 olarak kabul edilmiştir. Diğer değişkenler ise şöyledir: Gerinimle sertleşme üssü (n) = 0,26, gerinim hızına bağlılık parametresi (C) = 0,014.

Ayrıca makalede m (sıcaklıkla yumuşama üssü) parametresi için de değerler verilmiştir. Buna göre sıcaklık 1040 K'nin üstüne çıktığında m değeri 0,5, sıcaklık 1040 K ile 298 K arasında olduğunda m değeri 1,03 ve sıcaklık 298 K'den düşükse m değeri 1 olacaktır. Ancak yapılan analizler sonucunda hedefteki sıcaklık dağılımı incelendiğinde analiz sürecinde hedef sıcaklığı 298 K – 1040 K sınırları içerisinde kalmaktadır (Şekil 7.2.3.8.,16,25 ve 32). Bu nedenle modelleme yapılırken m değeri 1,03 olarak alınmıştır. Sonuç olarak kullanılan Johnson-Cook dayanım modeli parametreleri 4 farklı sertlik değeri için Çizelge 7.2.3.1'de sunulmuştur.

Çizelge 7.2.3.1. 4 Farklı Sertlik Değeri İçin AISI 4340 Çeliği Johnson-Cook Dayanım Modeli Parametreleri

Numune	HRC	σ_0 [MPa]	B	n	C	m	% Uzama
2A	40	1044,40	662,05	0,26	0,014	1,03	13,7
2B	50	1489,51	944,20	0,26	0,014	1,03	13
2C	55	1778,81	1127,59	0,26	0,014	1,03	12,1
2D	60	2124,31	1346,60	0,26	0,014	1,03	12

Analiz için kullanılan modelde ayrıca doğrusal hal denklemi kullanılmış olup bu denklemin parametreleri hidrokod yazılımının kendi kütüphanesinden doğrudan alınmıştır. Bu parametreler Çizelge 7.2.3.2'de sunulmuştur.

Çizelge 7.2.3.2. AISI 4340 Çeliği Doğrusal Hal Denklemi Parametreleri

Referans yoğunluğu	7830 kg/m ³
Hacim modülü	159 GPa
Özısı	477 J/(kg.K)
Termal iletkenlik	--

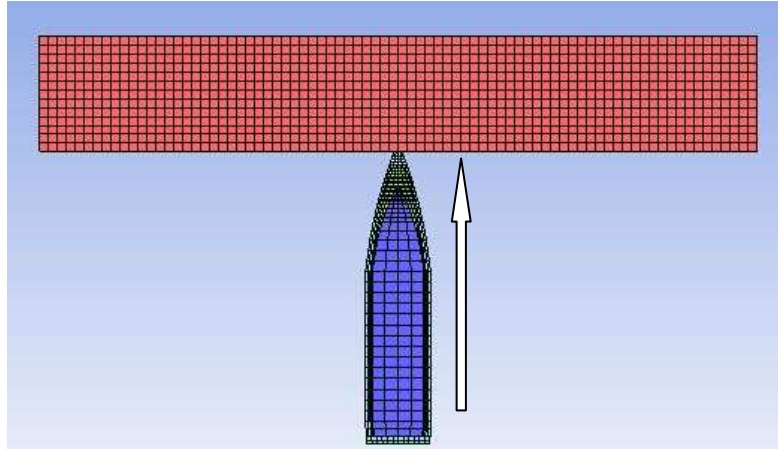
Benzetimlerde deney düzeneğine uygun olması açısından 80mm çaplı dairesel hedef plakaları yarı simetrik olarak (yarım silindir) modellenmiş, modeller etraflarından sınır koşullarıyla

sabitlenmiştir. Çözüm ağı olarak ise yaklaşık her 1 mm için 1 ağ elemanı gelmesine dikkat edilmiştir.

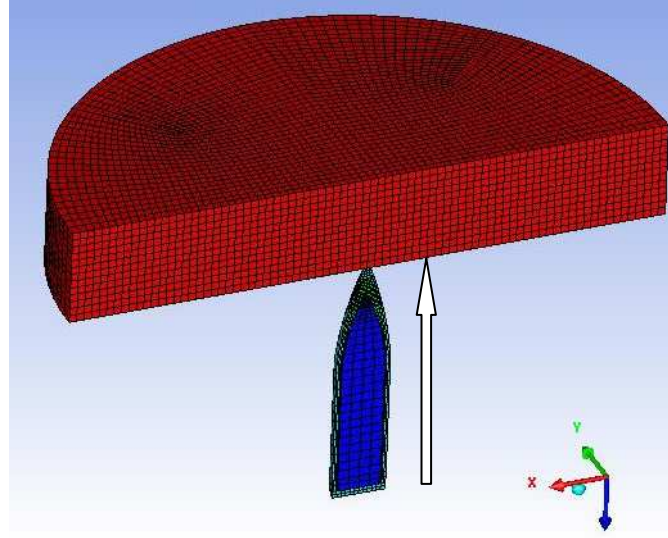
Kırılma modeli için ise sabit plastik gerinimli kırılma modeli kullanılmıştır. 2A atışları için kullanılan kırılma gerinimi değeri 0,137'dir.

Atış yapılırken 2A numunesinin tüm alan yoğunlukları yerine kritik olduğuna inanılan son iki alan yoğunluğu olan 2A-4 (12,8mm) ve 2A-5 (14,7mm) numuneleri kullanılmıştır. Bunun nedeni ise 2A-4 numunesinin tam olarak delinmesi, 2A-5 numunesinin ise delinmesi ancak merminin çıkıp gitmesine izin vermemesidir.

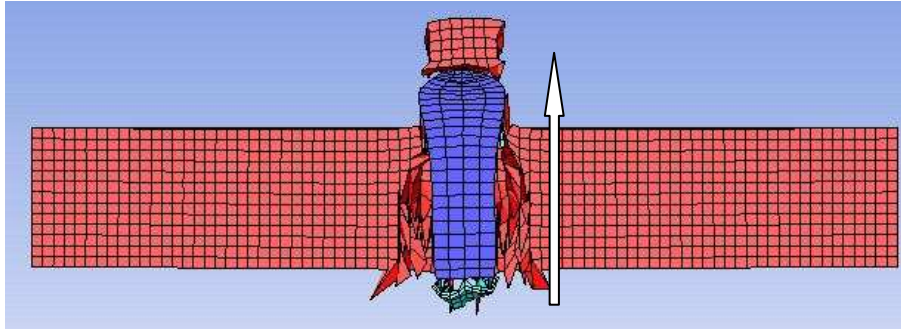
Yukarıda belirtilen bilgiler doğrultusunda hazırlanan modellerin benzetim öncesi ve sonrası görüntüleri ve sonuçları Şekil 7.2.3.2.-17'te görülmektedir.



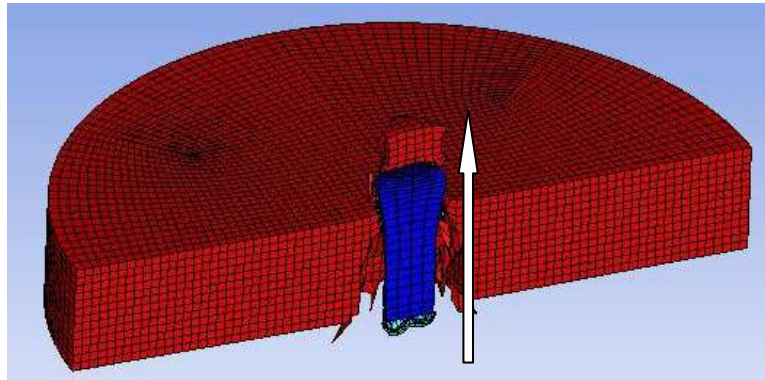
Şekil 7.2.3.2. 2A-4 Atış Öncesi Görünüm



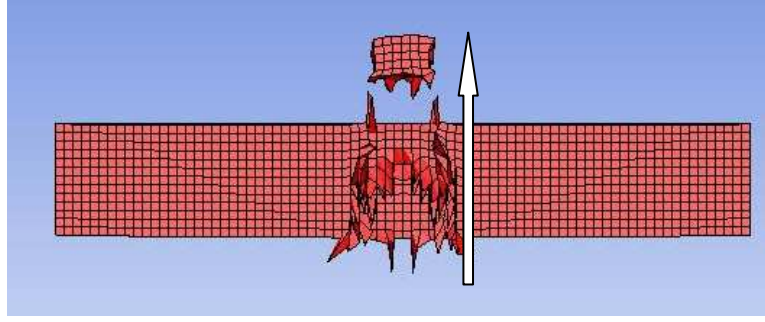
Şekil 7.2.3.3. 2A-4 Atış Öncesi Görünüm



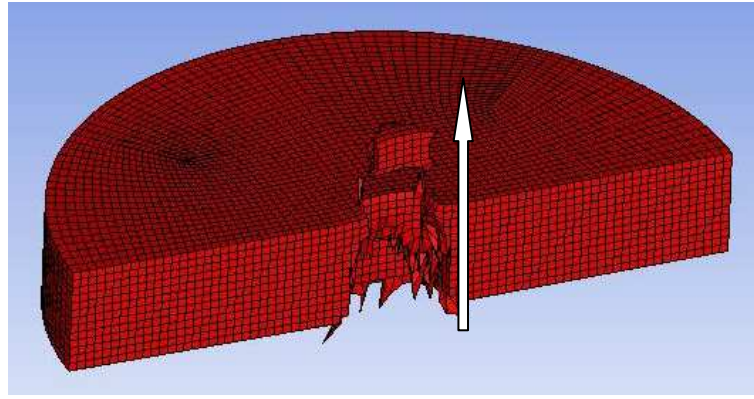
Şekil 7.2.3.4. 2A-4 Atış Sonrası Görünüm



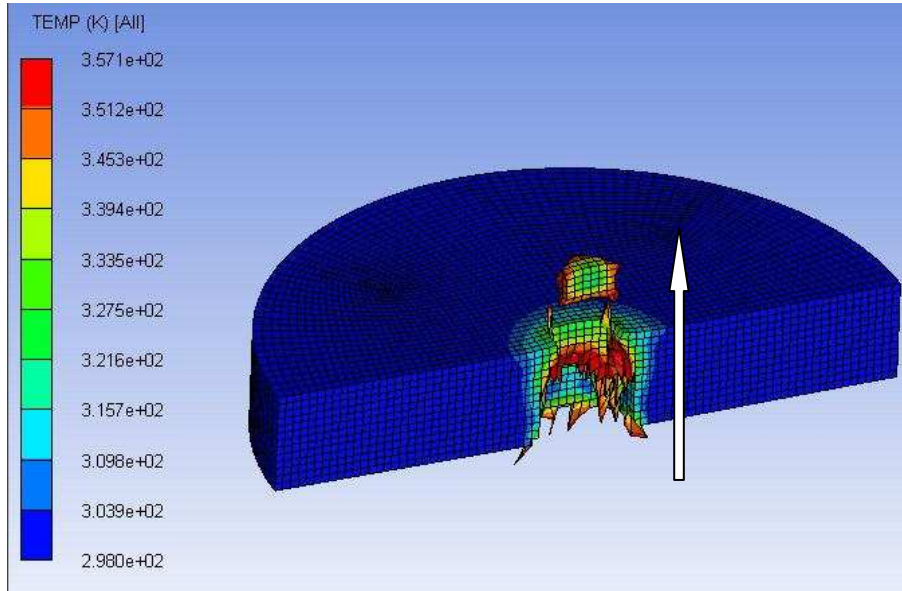
Şekil 7.2.3.5. 2A-4 Atış Sonrası Görünüm



Şekil 7.2.3.6. 2A-4 Atış Sonrası Görünüm (Yalnızca Hedef)

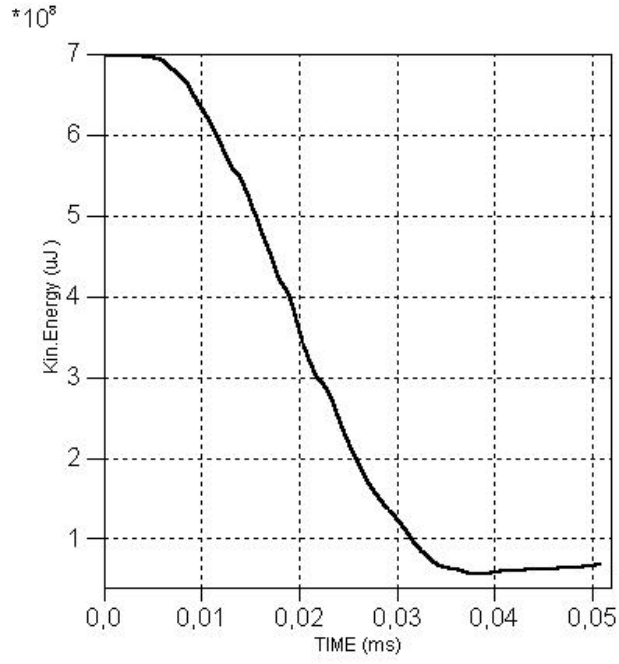


Şekil 7.2.3.7. 2A-4 Atış Sonrası Görünüm (Yalnızca Hedef)

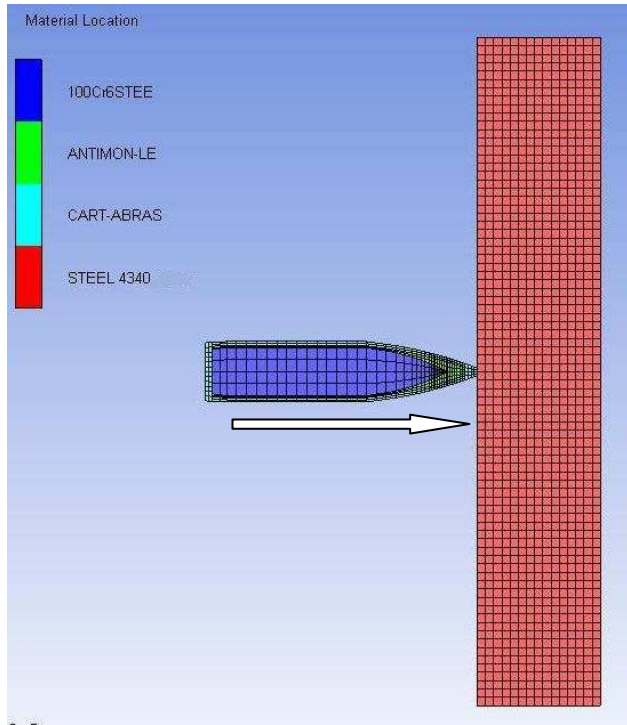


Şekil 7.2.3.8. 2A-4 Atış Sonrası Hedefteki Sıcaklık Dağılımı

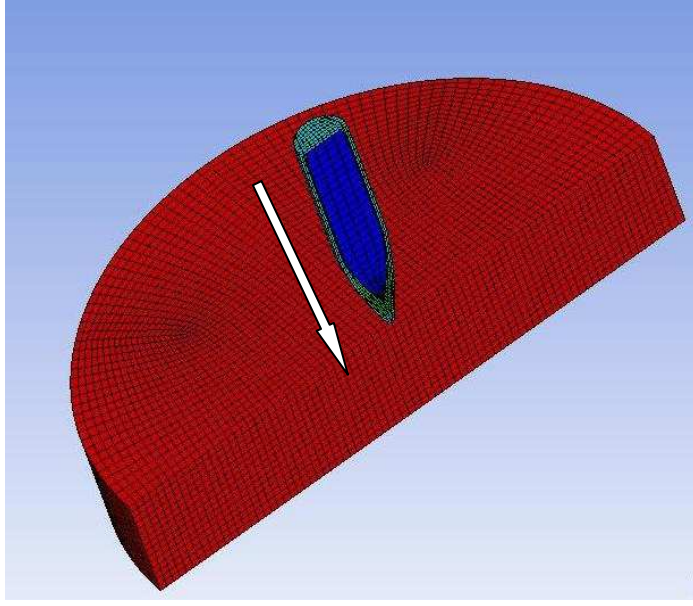
Material Summary (2a-4)



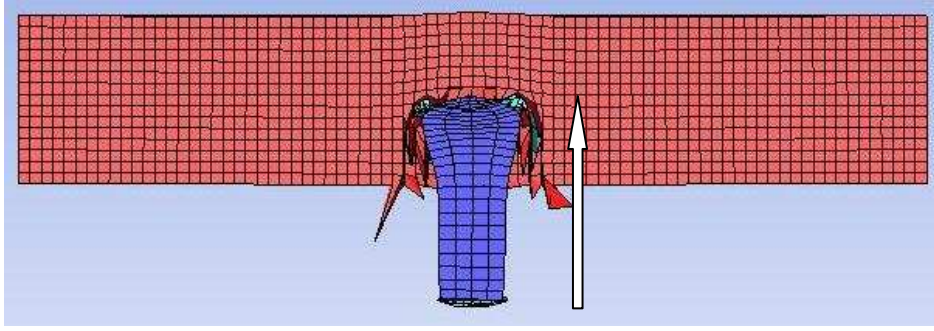
Şekil 7.2.3.9. 2A-4 Mermi Çekirdeği Kinetik Enerji Bilançosu



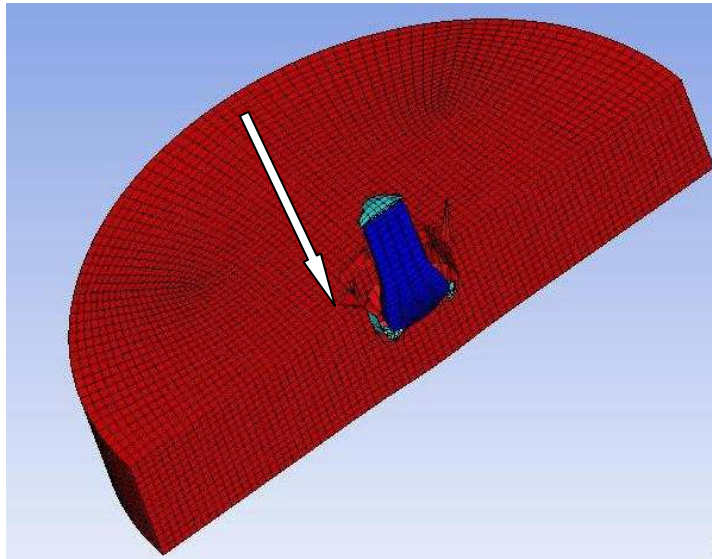
Şekil 7.2.3.10. 2A-5 Atış Öncesi Görünüm



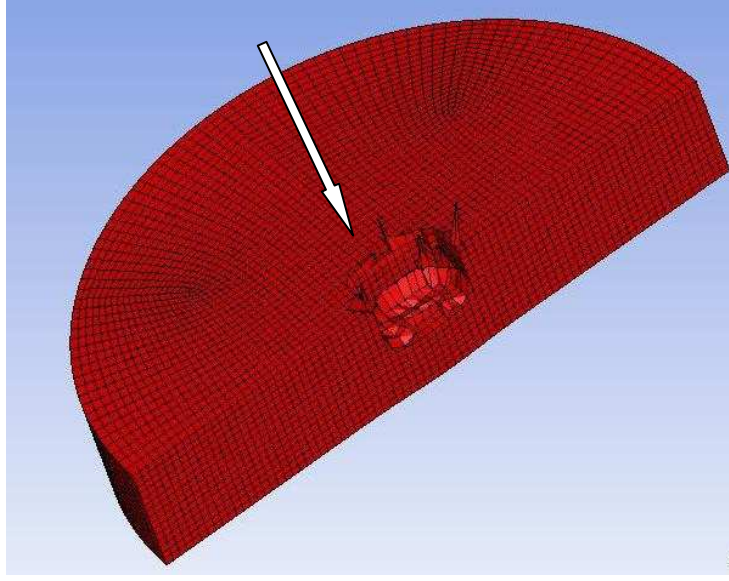
Şekil 7.2.3.11. 2A-5 Atış Öncesi Görünüm



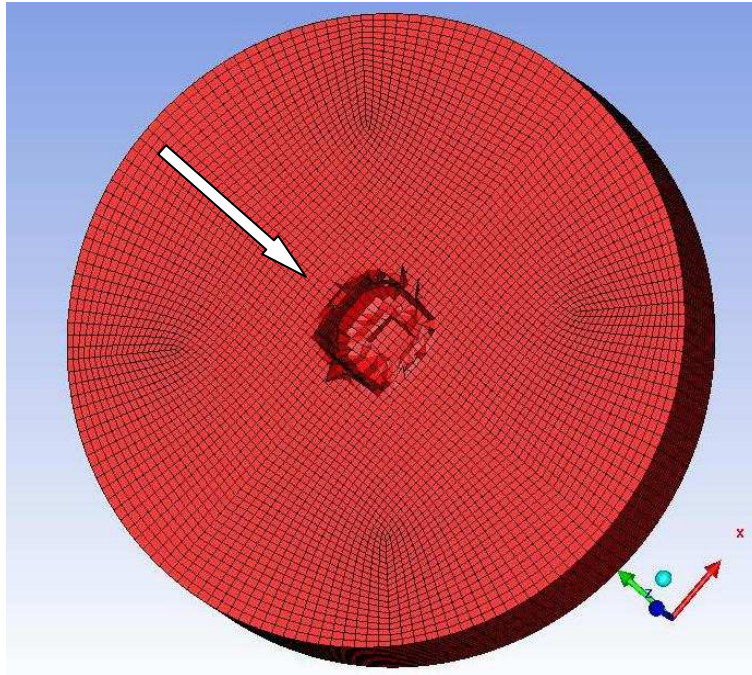
Şekil 7.2.3.12. 2A-5 Atış Sonrası Görünüm



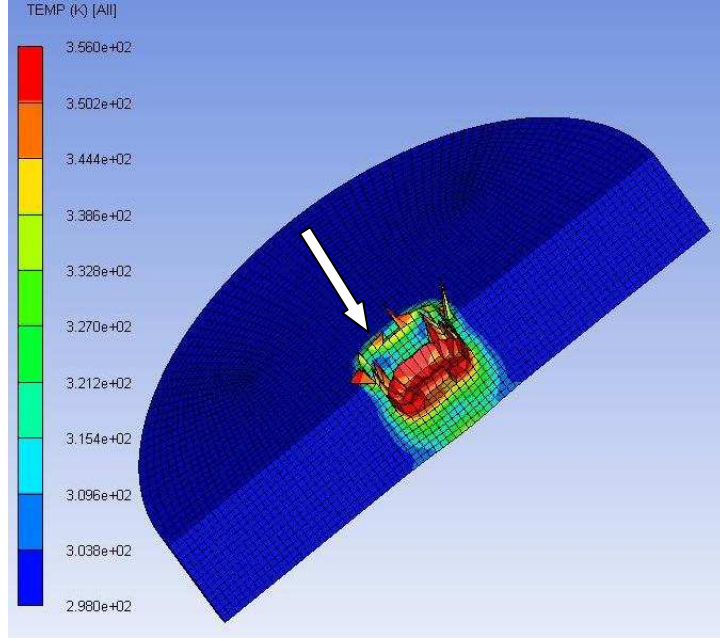
Şekil 7.2.3.13. 2A-5 Atış Sonrası Görünüm



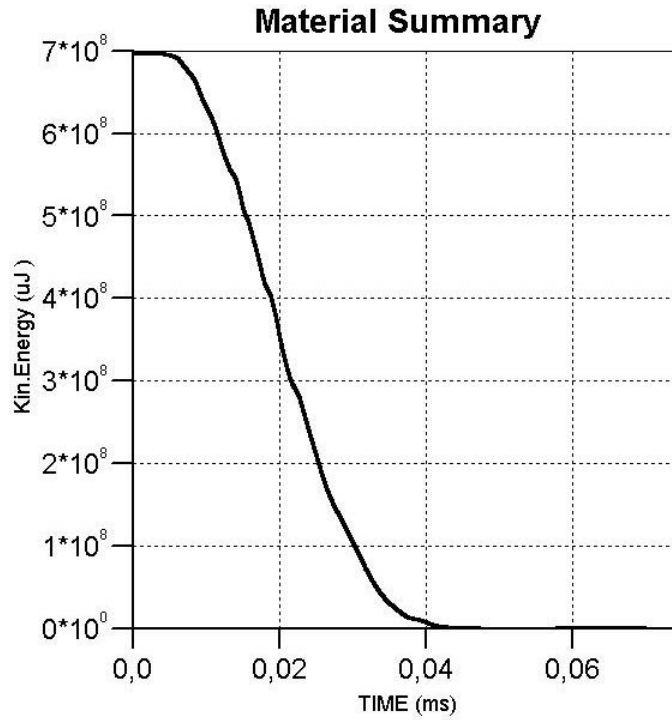
Şekil 7.2.3.14. 2A-5 Atış Sonrası Görünüm (Sadece Hedef)



Şekil 7.2.3.15. 2A-5 Atış Sonrası Görünüm (Sadece Hedef)



Şekil 7.2.3.16. 2A-5 Hedefteki Sıcaklık Dağılımı



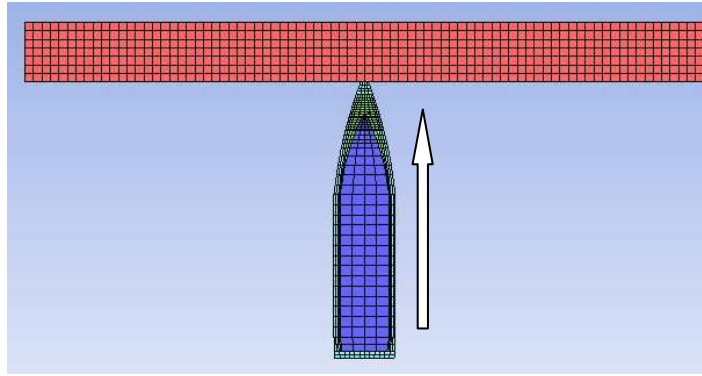
Şekil 7.2.3.17. 2A-5 Mermi Çekirdeği Kinetik Enerji Bilançosu

Sonuç olarak 785 m/s hızla atılan 7.62 mm AP mermisinin 2A-4 numunesini deldiği, 2A-5 numunesini ise delemmediği görülmüştür. Deneysel sonuçlara baktığımızda da 2A-4 numunesine atılan merminin numuneyi delip geçtiği, 2A-5 numunesine atılan merminin ise

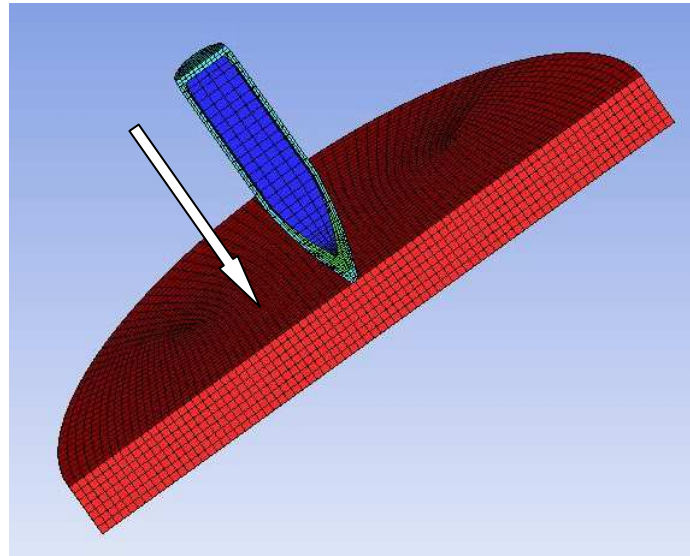
hedefi deldiği ancak arka taraftan çıkıp gidecek kadar enerjiye sahip olmadığı görülmüştür. Bu durum bilgisayar benzetimleriyle de benzerlik göstermektedir.

2B kodlu numune için de Çizelge 7.2.3.1. ve 2'de görülen dayanım ve hal denklem parametreleri kullanılmıştır. Özel olarak 2B-1 ve 2B-2 numuneleri üzerinde durulmuştur. Modeller yine 2A numunesindeki gibi oluşturulmuş, hedef kalınlıkları 2B-1 için 7mm, 2B-2 için ise 9mm olacak şekilde ayarlanmıştır. Kırılma ölçütü olarak da 0,130 sabit plastik gerinim değeri kullanılmıştır.

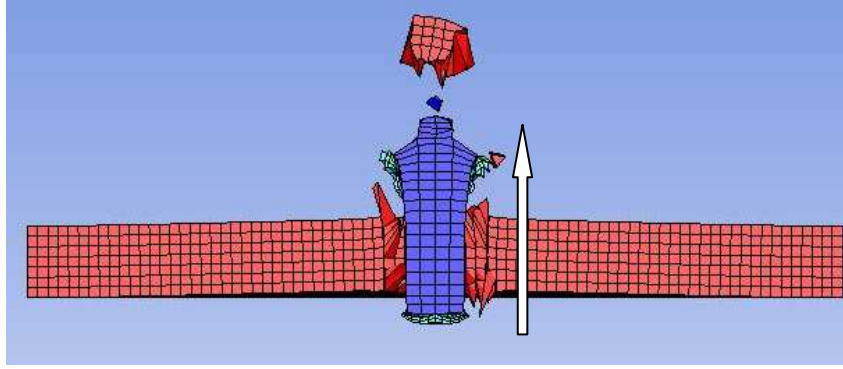
Benzetimler sonucunda 2B-1 numunesinin rahatça delindiği, 2B-2 numunesinin ise delinmediği ortaya çıkmıştır. Deneysel sonuçlar incelendiğinde bu sonuçların beklenen sonuçlar olduğu anlaşılmaktadır. Benzetim öncesi ve sonrası model görüntüleri ve sonuçları Şekil 7.2.3.18.-32'de sunulmuştur.



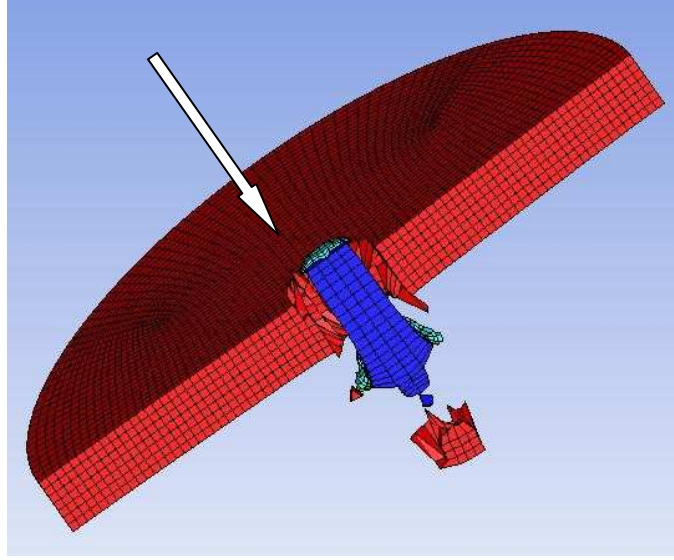
Şekil 7.2.3.18. 2B-1 Numunesi Atış Öncesi Kesit Görünümü



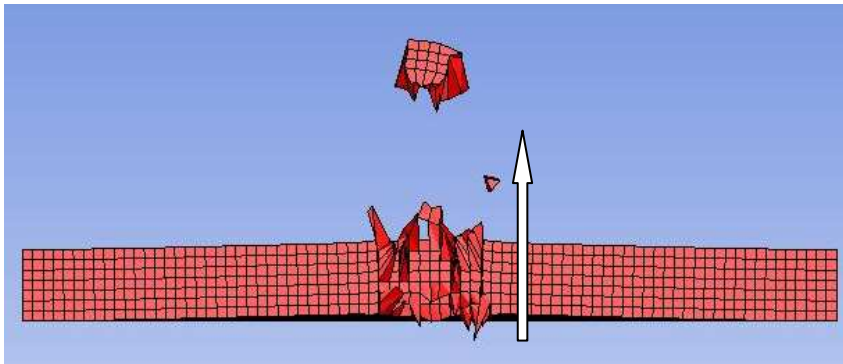
Şekil 7.2.3.19. 2B-1 Numunesi Atış Öncesi Kesit Görünümü



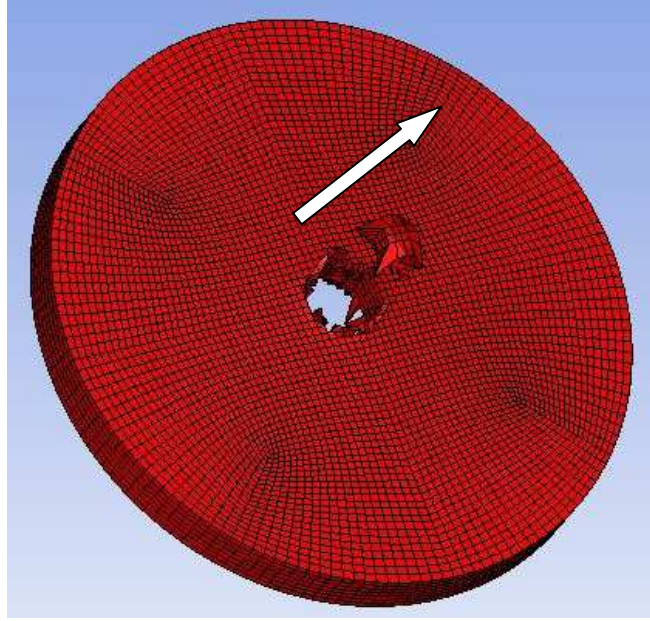
Şekil 7.2.3.20. 2B-1 Numunesi Atış Sonrası Kesit Görünümü



Şekil 7.2.3.21. 2B-1 Numunesi Atış Sonrası Kesit Görünümü

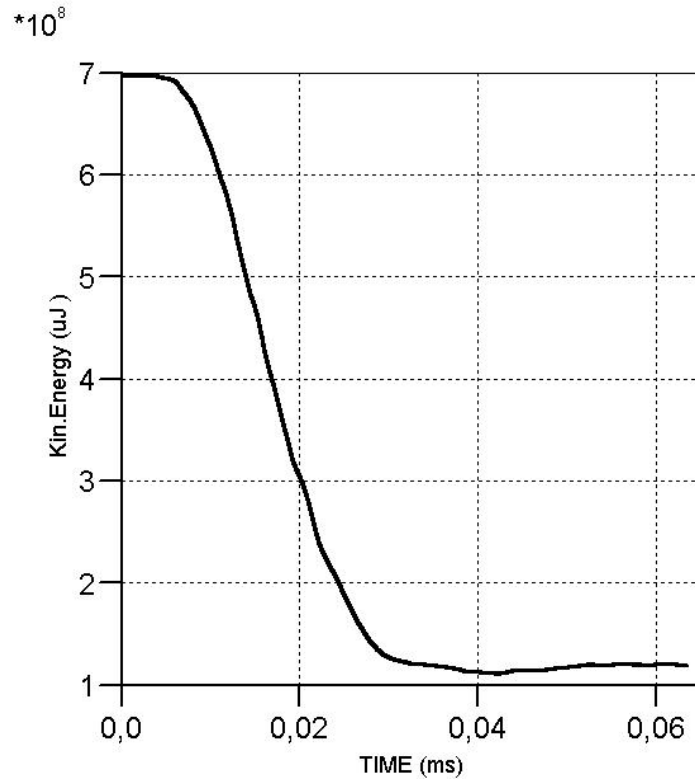


Şekil 7.2.3.22. 2B-1 Numunesi Atış Sonrası Kesit Görünümü (Sadece Hedef)

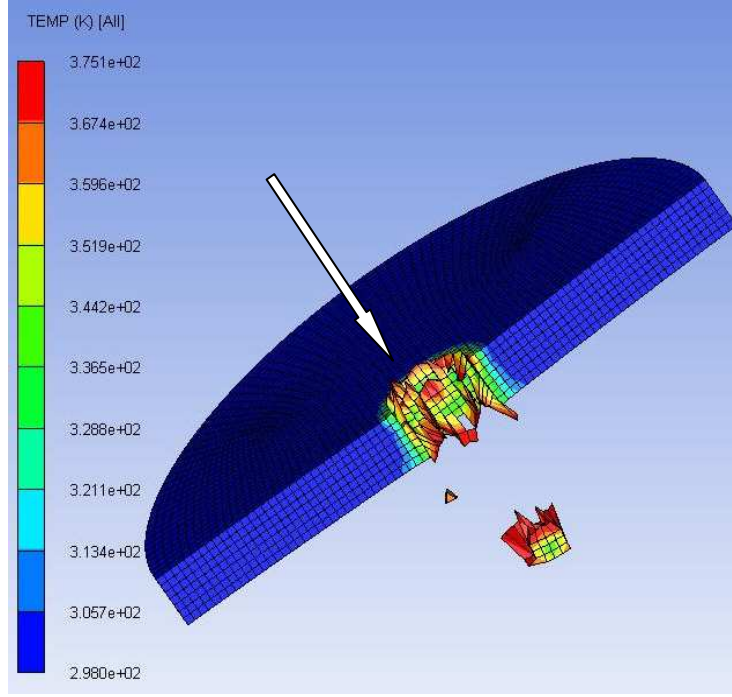


Şekil 7.2.3.23. 2B-1 Numunesi Atış Sonrası Bütün Görünüm

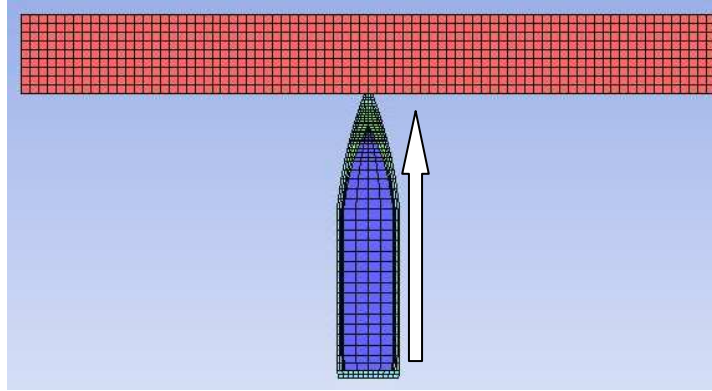
Material Summary (2b-1)



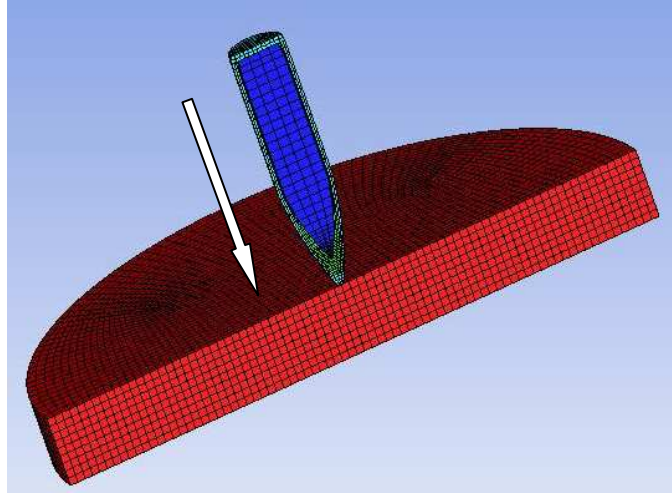
Şekil 7.2.3.24. 2B-1 Numunesi Mermi Çekirdeği Kinetik Enerji Bilançosu



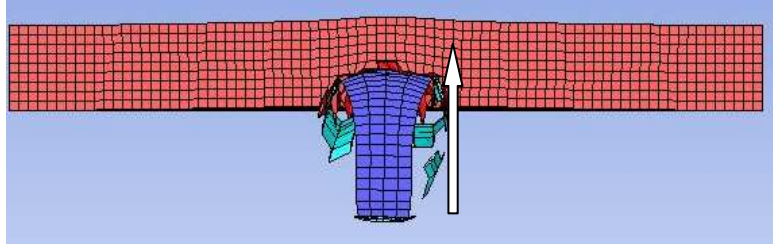
Şekil 7.2.3.25. 2B-1 Numunesi Atış Sonrası Hedefteki Sıcaklık Dağılımı



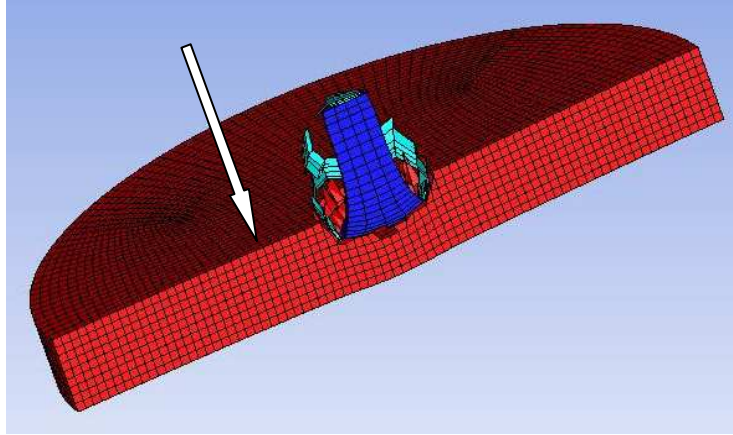
Şekil 7.2.3.26. 2B-2 Numunesi Atış Öncesi Kesit Görünümü



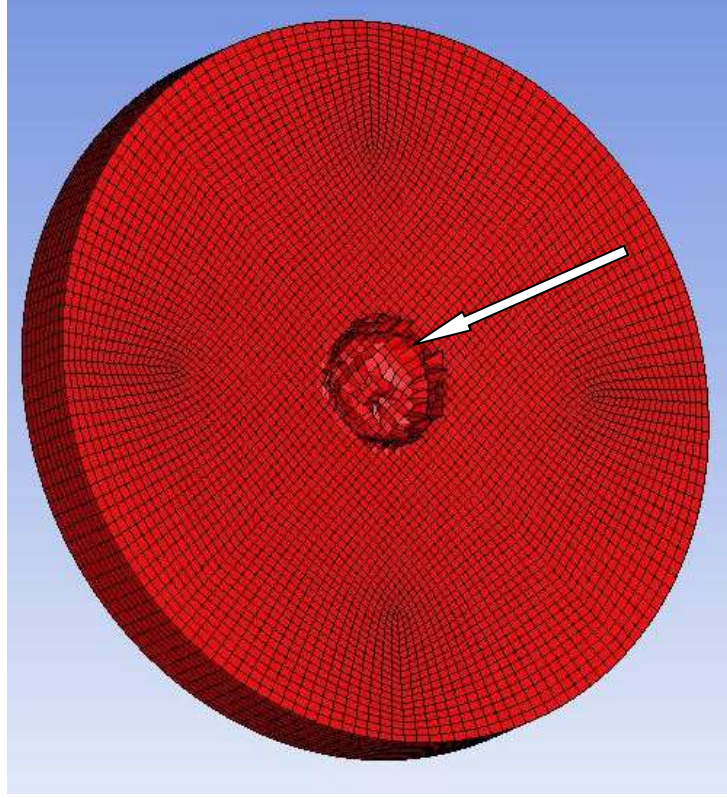
Şekil 7.2.3.27. 2B-2 Numunesi Atış Öncesi Kesit Görünümü



Şekil 7.2.3.28. 2B-2 Numunesi Atış Sonrası Kesit Görünümü

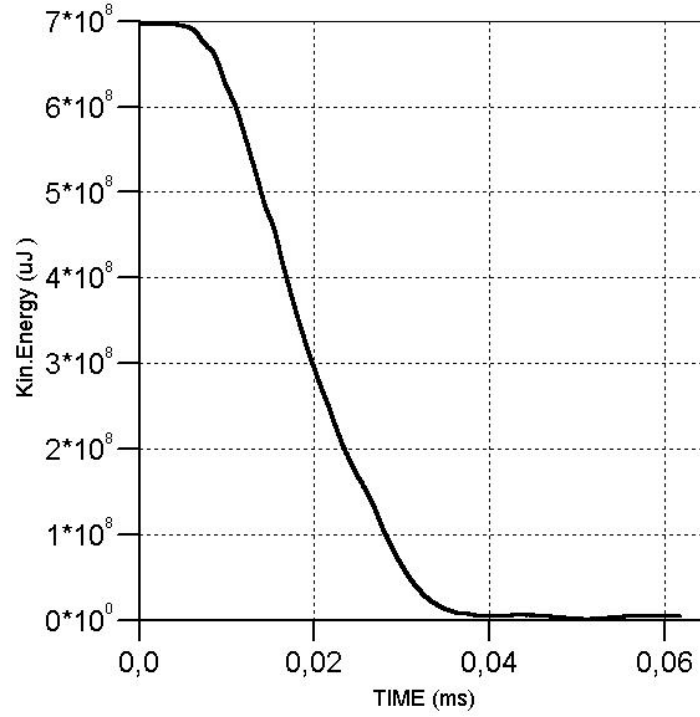


Şekil 7.2.3.29. 2B-2 Numunesi Atış Sonrası Kesit Görünümü

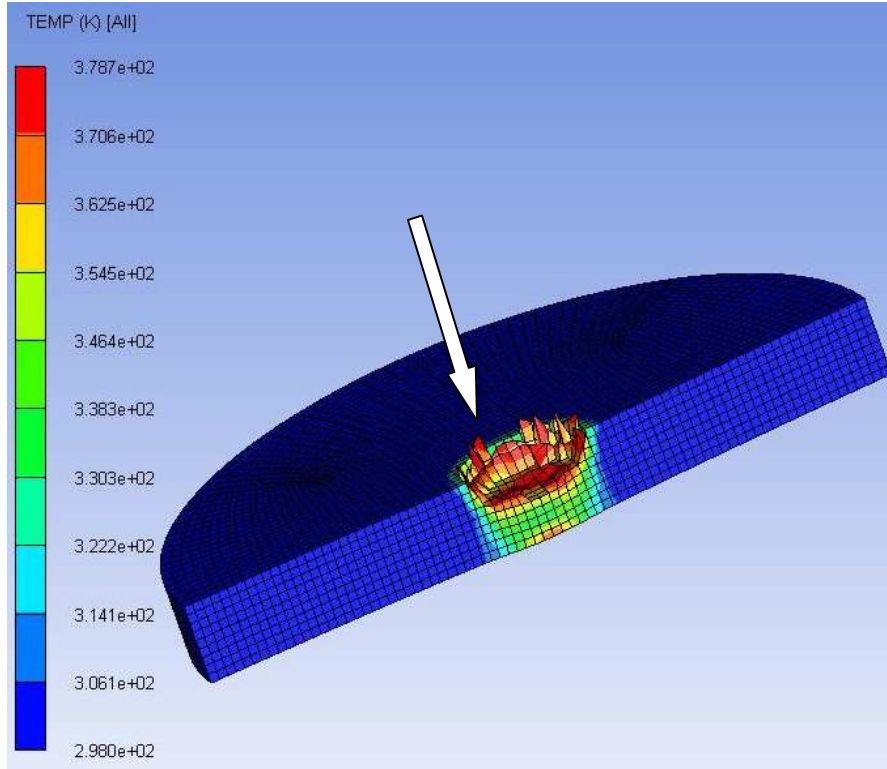


Şekil 7.2.3.30. 2B-2 Numunesi Atış Sonrası Görünümü

Material Summary (2b-2)



Şekil 7.2.3.31. 2B-2 Numunesi Mermi Çekirdeği Kinetik Enerji Bilançosu



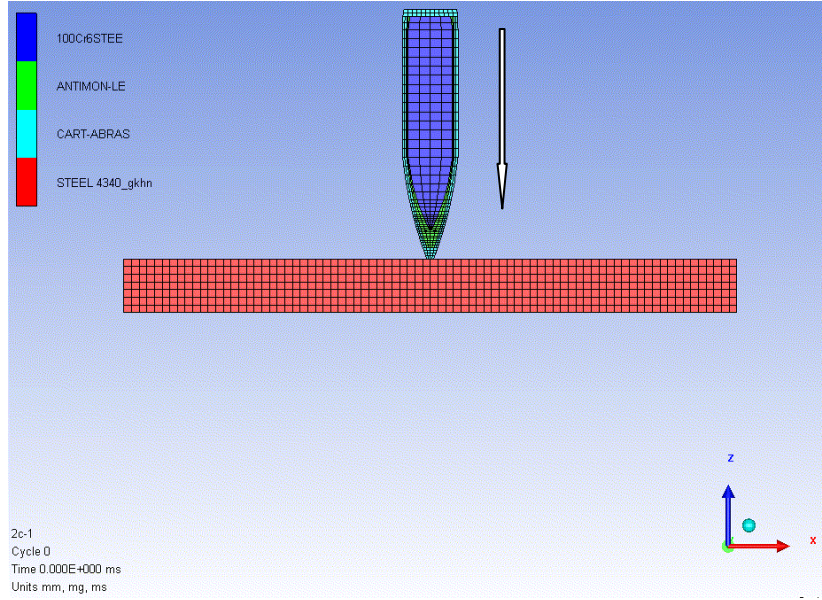
Şekil 7.2.3.32. 2B-2 Numunesi Atış Sonrası Hedefteki Sıcaklık Dağılımı

Deneysel çalışmalar sonucunda 2C ve 2D numunelerinin kullanılan alan yoğunluklarının hiçbirinde delinmediği ancak ilk iki alan yoğunluğunda (7,2 mm ve 9 mm kalınlık) kırılarak başarısız olduğu görülmüştür. Bu durumun sebebinin raporun deneysel kısmında ayrıntılı olarak anlatılan adyabatik kayma bantlarının oluşumu olduğu söylenebilir. Bilgisayar benzetim çalışmalarından elde edilen sonuçlar da bu iki numunenin kullanılan en düşük alan yoğunluğunda (7,2 mm kalınlıkta) bile delinmediğini göstermiştir. Ancak adyabatik kayma bantları sebebiyle oluşan kırılmalar ve bu kırılmalar sonucunda numunenin başarısız olması durumu, benzetim çalışmalarında görülemediği. Bu kırılmaların benzetimde görülememesi, kullanılan dayanım ve kırılma modellerinin son derece yeni bir konu olan adyabatik kayma bantlarının etkilerini hesaba katma yeterliliklerinin olmamasından kaynaklanmaktadır.

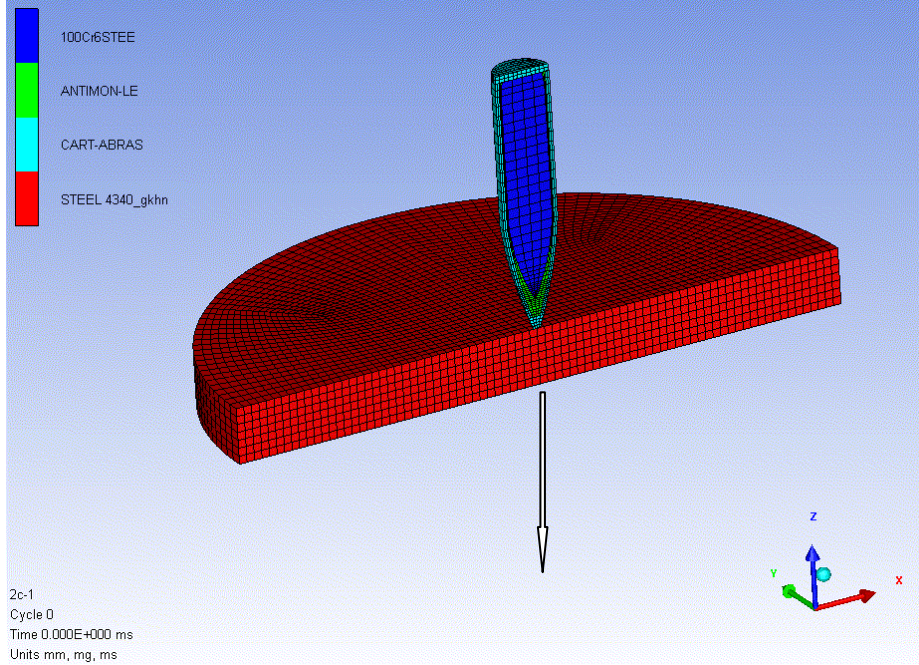
Yukarıda belirtilen bilgiler doğrultusunda hazırlanan modellerin benzetim öncesi ve sonrası görüntüleri ve mermi çekirdeklerinin kinetik enerji ve ortalama hız grafikleri Şekil 7.2.3.33-46'da verilmektedir.

2C numunesi için hazırlanan modelde mermi çekirdeğinin kinetik enerji ve ortalama hız değişimleri (Şekil 7.2.3.38 ve 7.2.3.39) incelendiğinde, mermi-hedef etkileşimi yaklaşık

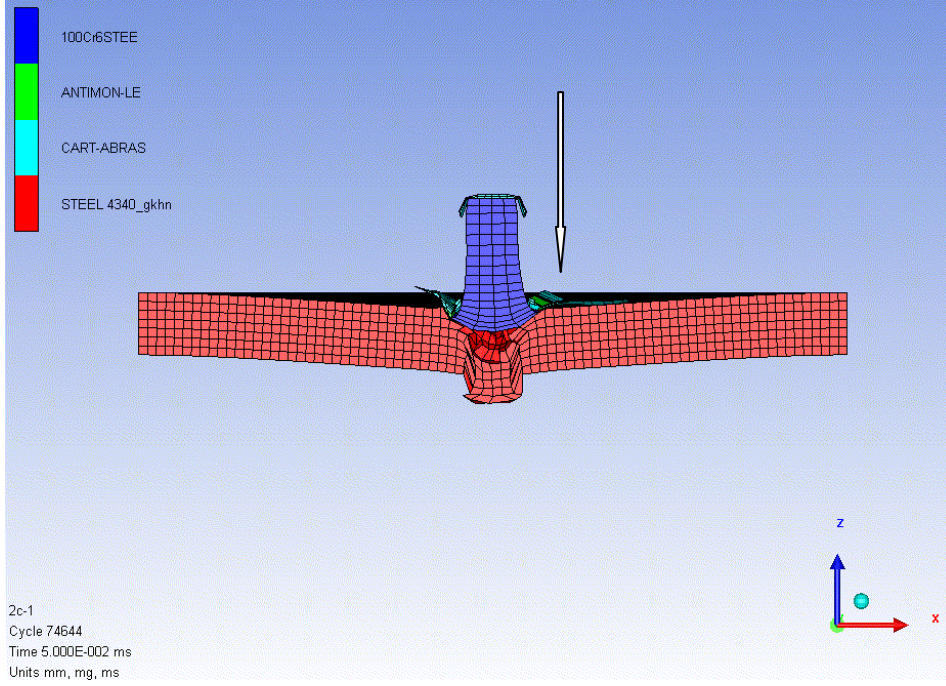
olarak 0,04 ms sürmüştür. Benzetim bir müddet daha devam ettirilmiş ve hedeften parça koptuğu (plugging) görülmüştür. Ancak merminin hedefin diğer tarafına geçemediği ve hedef tarafından durdurulduğu gözlenmiştir.



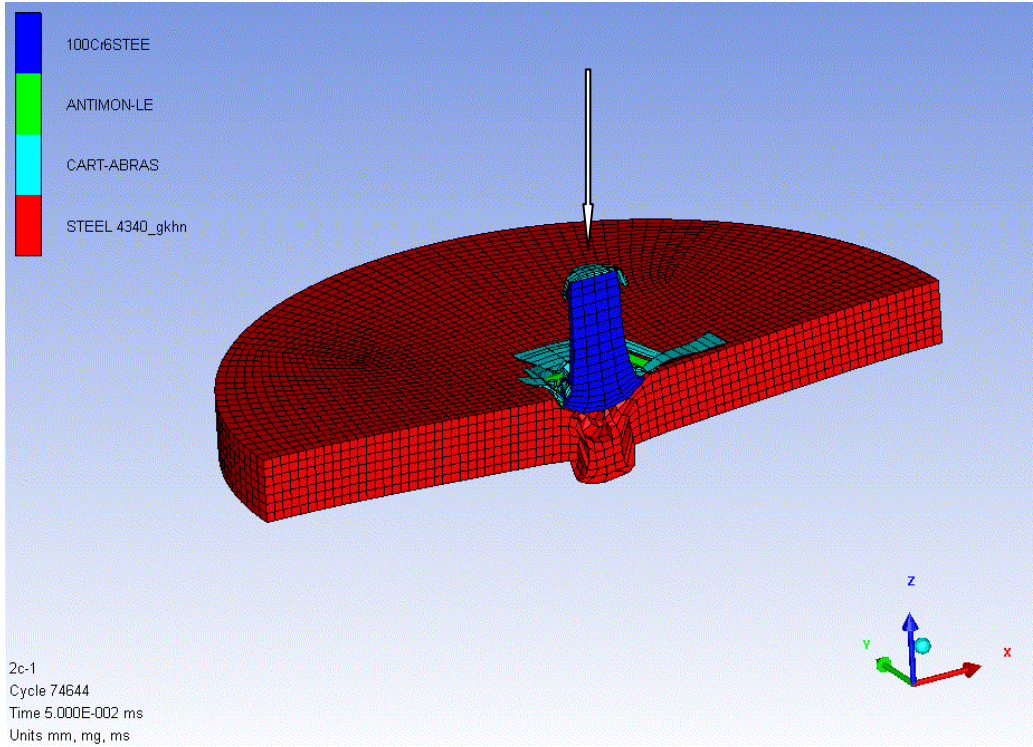
Şekil 7.2.3.33. 2C-1 Numunesinin Atış Öncesi Görünümü



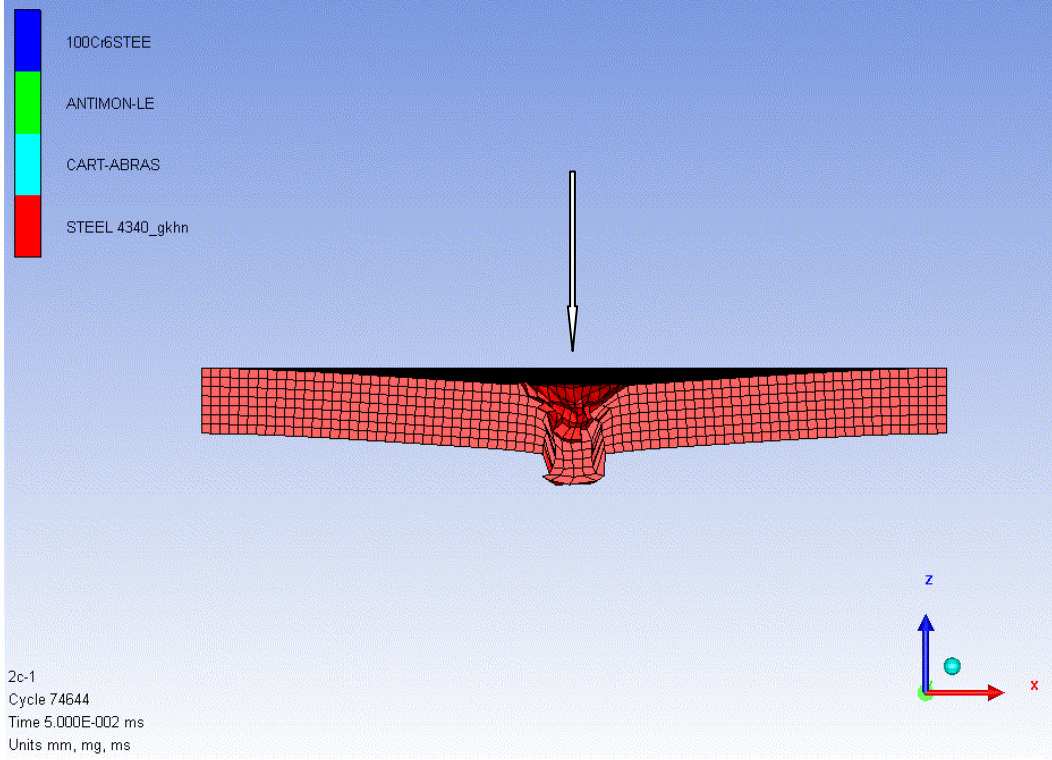
Şekil 7.2.3.34. 2C-1 Numunesinin Atış Öncesi İzometrik Görünümü



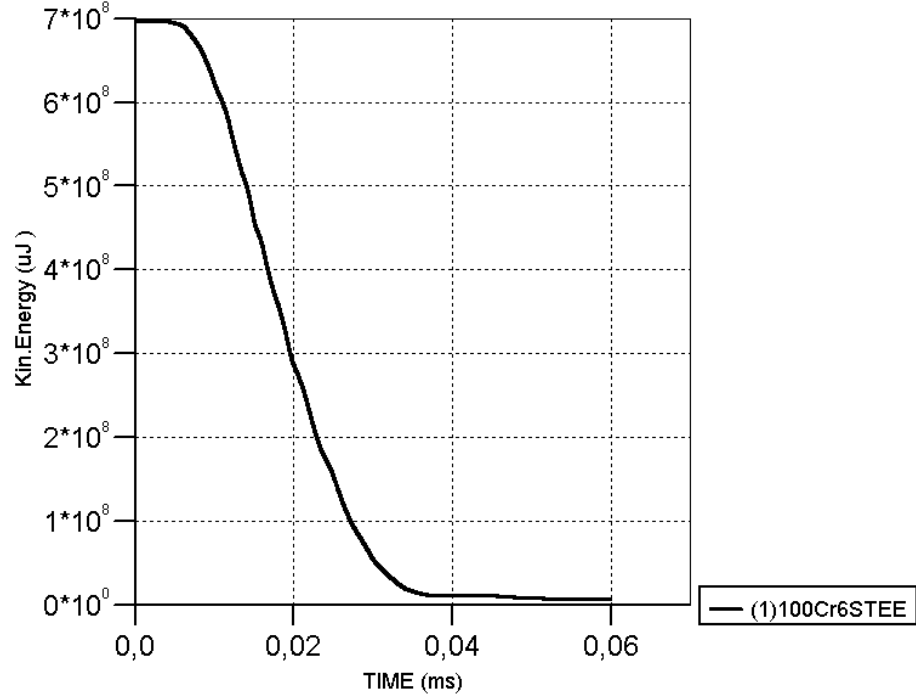
Şekil 7.2.3.35. 2C-1 Numunesinin Atış Sonrası Görünümü



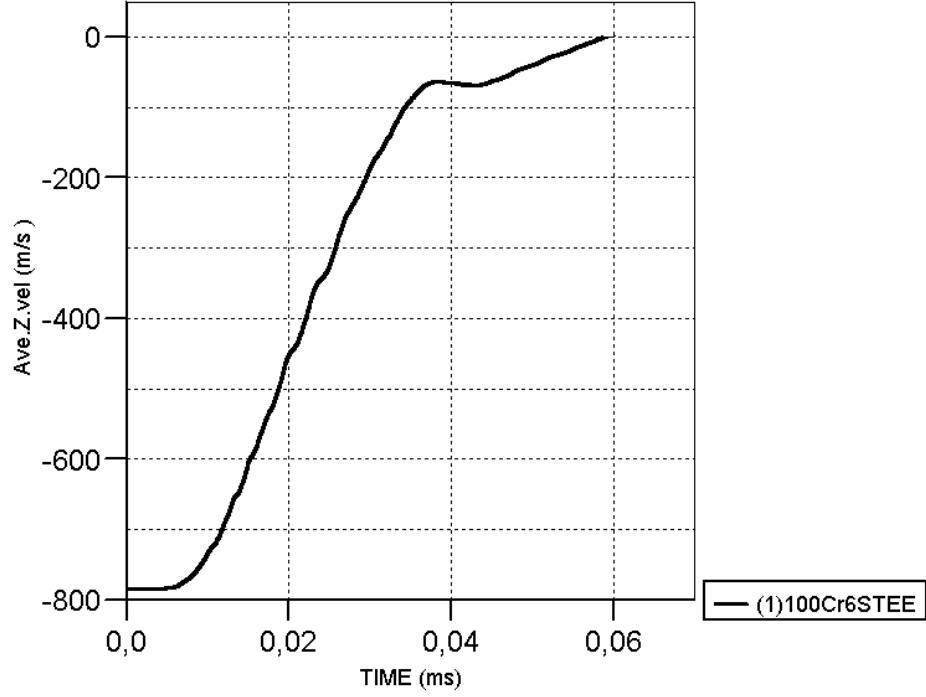
Şekil 7.2.3.36. 2C-1 Numunesinin Atış Sonrası İzometrik Görünümü



Şekil 7.2.3.37. 2C-1 Modeli Hedef Plakasının Atış Sonrası Görünümü

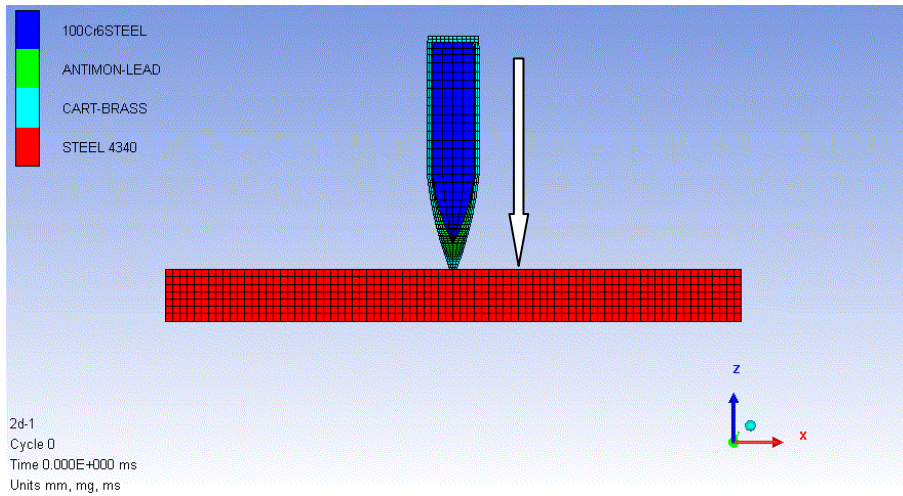


Şekil 7.2.3.38. 2C-1 Modeli, Mermi Çekirdeği Kinetik Enerji Bilançosu

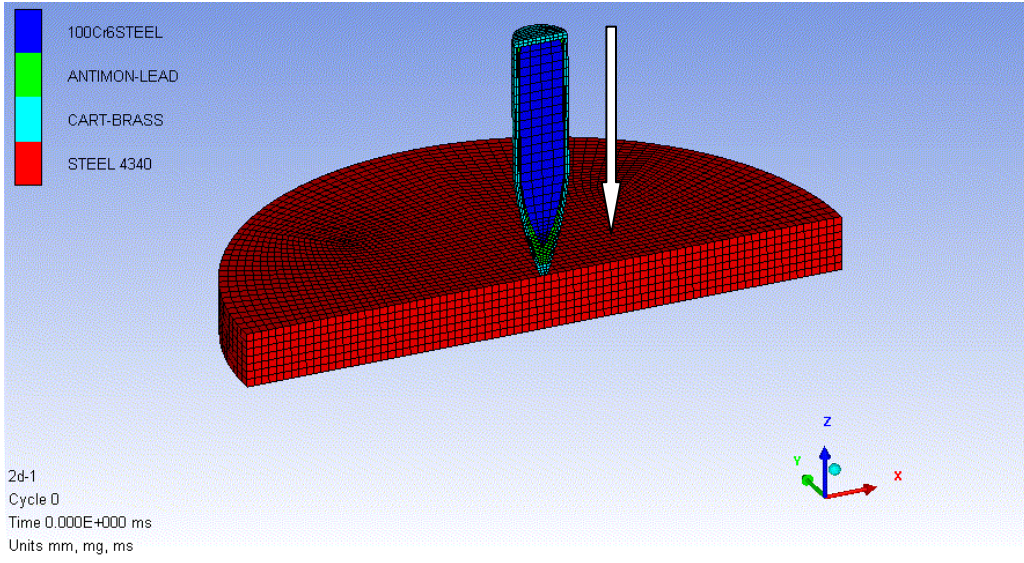


Şekil 7.2.3.39. 2C-1 Modeli, Mermi Çekirdeğinin Ortalama Hızı (Atış $-z$ yönünde yapılmıştır)

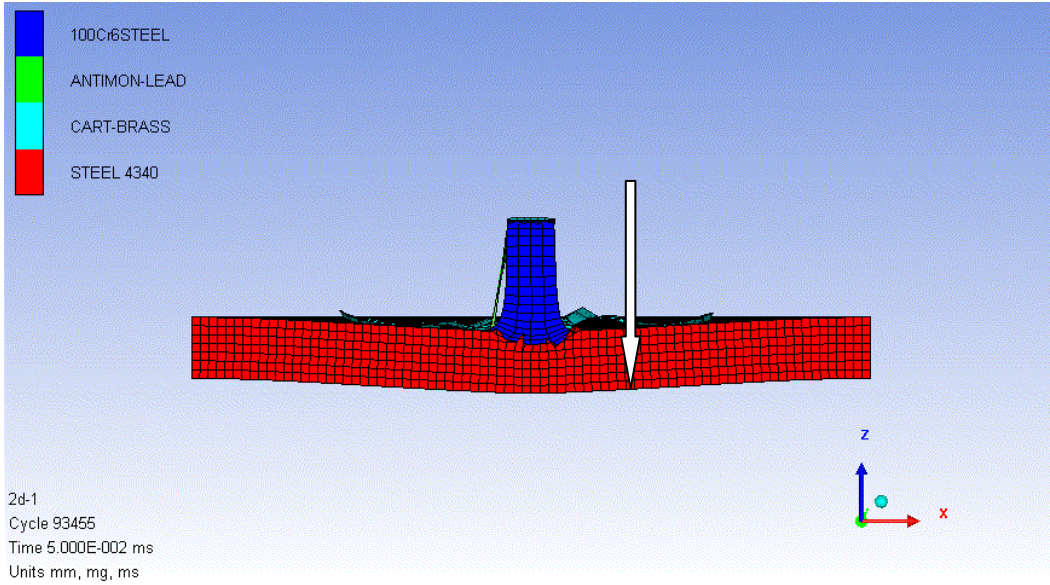
2D numunesi için hazırlanan modelde mermi çekirdeğinin kinetik enerji ve ortalama hız değişimleri (Şekil 7.2.3.45 ve 7.2.3.46) incelendiğinde, mermi-hedef etkileşimi aynen 2C numunesinde olduğu gibi yaklaşık olarak 0,04 ms sürmüştür. Benzetim bir müddet daha devam ettirilmiş ve merminin hedeften geri sektiği gözlemlenmiştir. Bu sekme, hem Şekil 7.2.3.46'deki ortalama hız grafiğinin belli bir süreden sonra (yaklaşık 0,05 ms) pozitif değerle çıkmasından da anlaşılabilir.



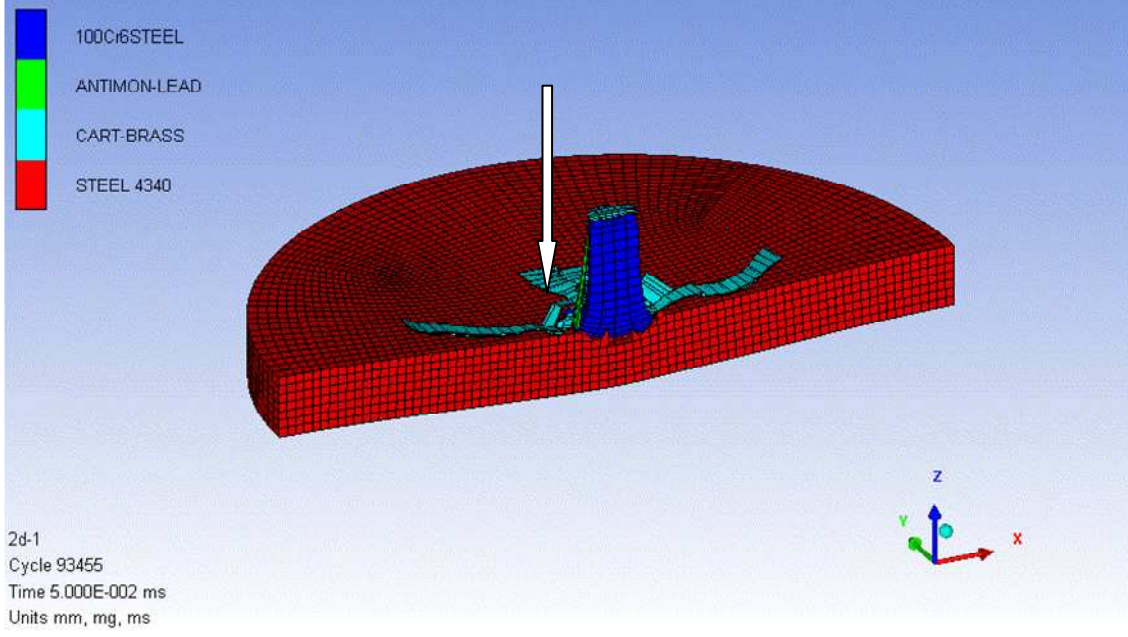
Şekil 7.2.3.40. 2D-1 Numunesinin Atış Öncesi Görünümü



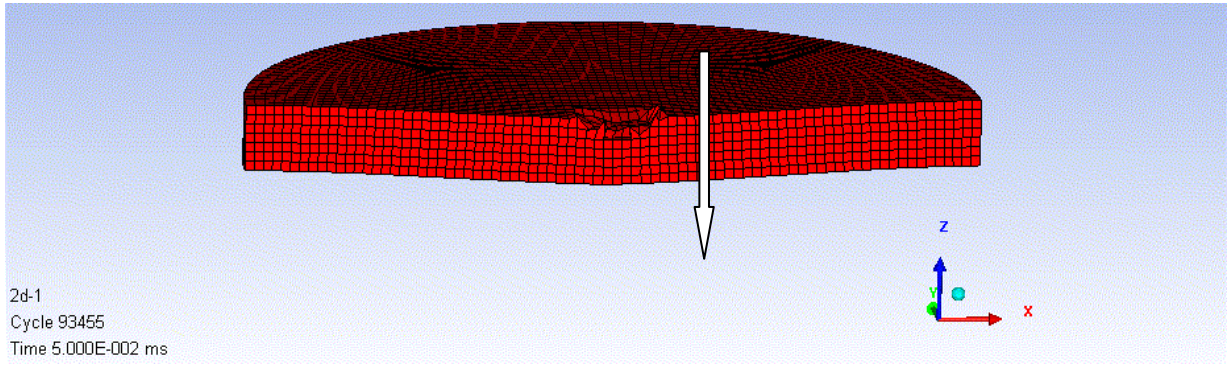
Şekil 7.2.3.41. 2D-1 Numunesinin Atış Öncesi İzometrik Görünümü



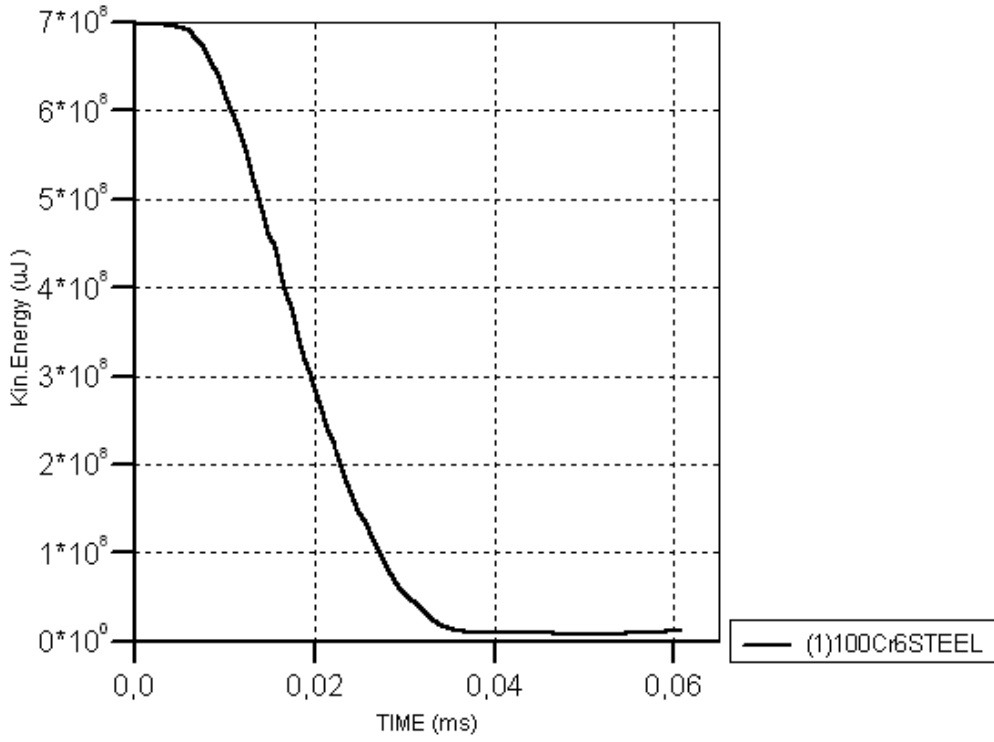
Şekil 7.2.3.42. 2D-1 Numunesinin Atış Sonrası Görünümü



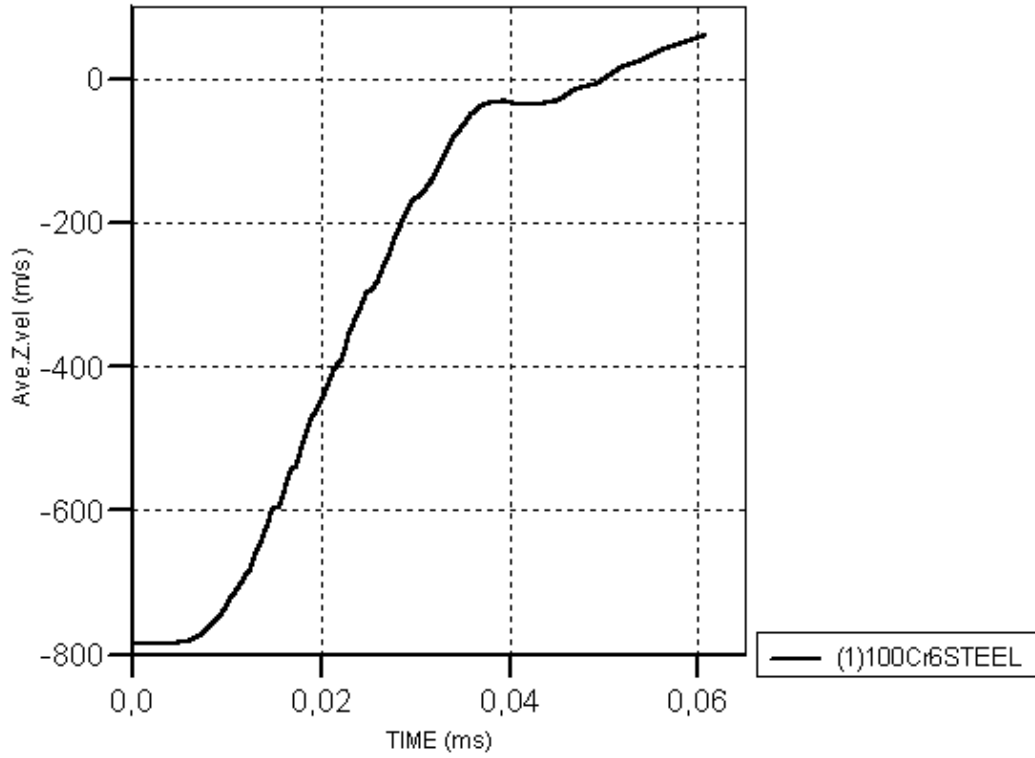
Şekil 7.2.3.43. 2D-1 Numunesinin Atış Sonrası İzometrik Görünümü



Şekil 7.2.3.44. 2D-1 Modeli Hedef Plakasının Atış Sonrası Görünümü



Şekil 7.2.3.45. 2D-1 Modeli, Mermi Çekirdeği Kinetik Enerji Bilançosu



Şekil 7.2.3.46. 2D-1 Modeli, Mermi Çekirdeğinin Ortalama Hızı (Atış -z yönünde yapılmıştır)

7.2.4. DIN 100Cr6

Hedef malzemesi olarak kullanılan 100Cr6 (**3A**, **3B**, **3C** ve **3D** olarak tanımlanmıştır) için hidrokod yazılımında kullanılmak üzere yapılan literatür taramasında dayanım ve kırılma modeli bulunamamıştır. Bu malzemenin çekirdek malzemesi ile aynı olduğu göz önünde bulundurularak bu malzeme için Bölüm 7.1.4'te verilen dayanım modeli üzerinde değişiklik yaparak bir dayanım modeli elde etme yoluna gidilmiştir. Söz gelimi, Johnson-Cook dayanım modeli kullanılmış olup, akma gerilmesi değeri olan 2033 MPa (mermi çekirdeği) yerine hedef malzeme grubu için bulunan akma dayanımı değerleri girilmiştir. Yine bu malzemeler için bulunan yüzde uzama değerlerinden yararlanılarak sabit plastik gerinime dayalı kırılma modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan hedef plaka modelleri için 1,5 artımsal aşınma gerinimi tanımlanmış olup, örgü yapısı daha önceki atışlarla benzer olarak alınmıştır.

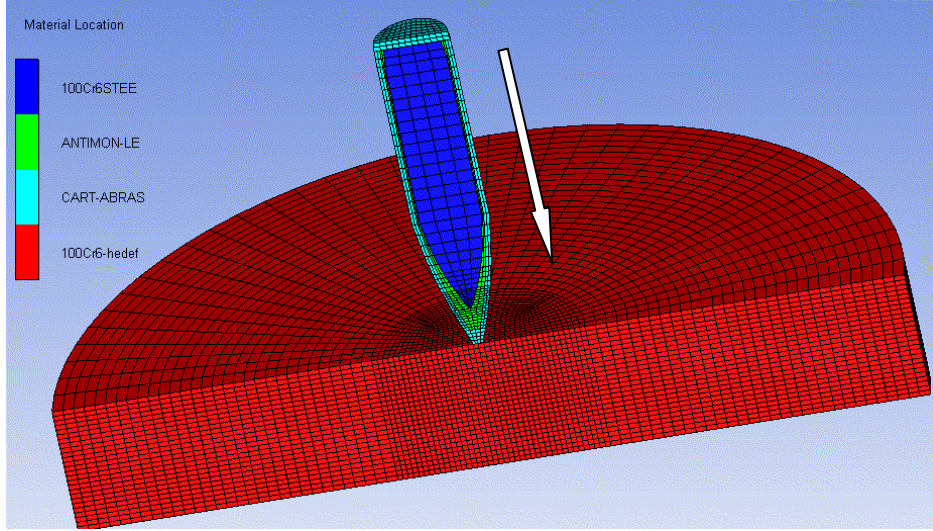
3A numuneleri için dayanım modeli parametreleri Çizelge 7.2.4.1 'de verilmiştir. Kırılma modeli için 0,123 gerinim değeri alınmıştır.

Çizelge 7.2.4.1. 3A Hedef malzemesi için dayanım modeli sabitleri

100Cr6 çeliği	
Kesme modülü	80 GPa
Akma gerilmesi σ_0 (A)	1200 MPa
Sertleşme sabiti (B)	895 MPa
Sertleşme üssü (n)	0,3
Gerinim hızı sabiti (C)	0,0095
Termal yumuşama üssü (m)	1,03
Ergime sıcaklığı	1793 K

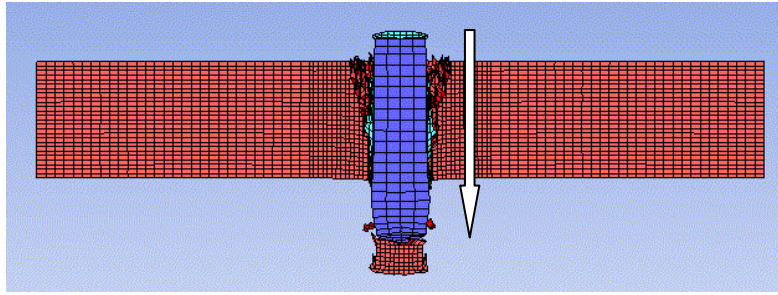
Deney sonuçlarına göre 3A grubu için dördüncü alan yoğunluğuna kadar numuneler delinirken beşinci alan yoğunluğundaki numuneler delinmemiştir. Bu yüzden kritik olan son iki alan yoğunluğu için sayısal benzetimler yapılmıştır.

3A4 hedef plakası için oluşturulan örgü yapısı ve mermi ve plakanın benzetim öncesi görüntüsü Şekil 7.2.4.1'de görülebilir. Hedef kalınlığı 12,7 mm olarak alınmıştır.

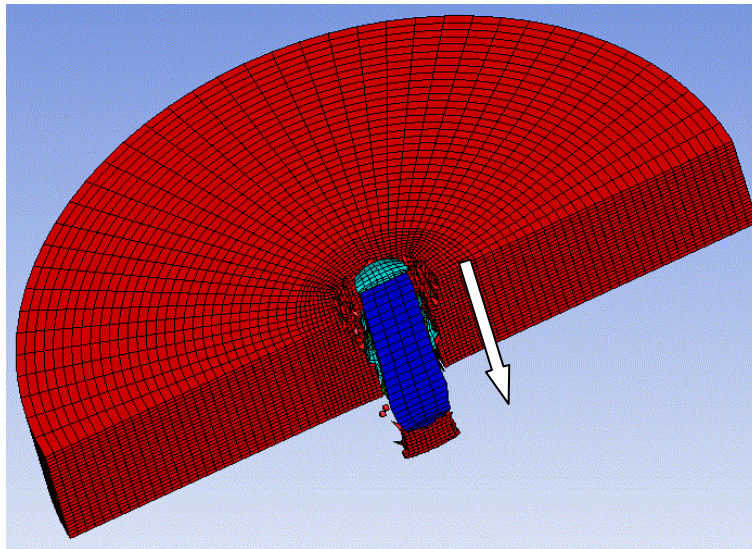


Şekil 7.2.4.1. 3A4 numunesi benzetim öncesi görüntü

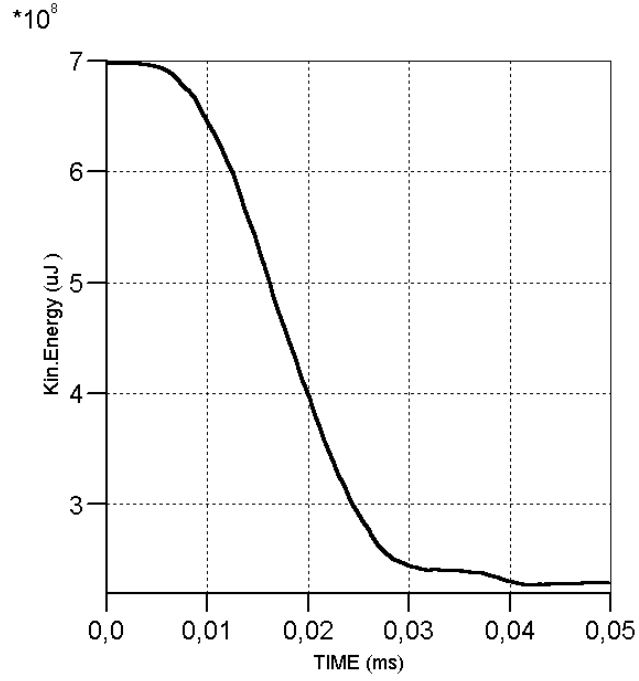
3A4 numunesinin benzetim sonrası görüntüleri Şekil 7.2.4.2-3'de verilmiştir. Yine mermi çekirdeğinin kinetik enerji değişimi Şekil 7.2.4.4'te verilmiştir.



Şekil 7.2.4.2. 3A4 numunesi benzetim sonrası görüntü (kesit)



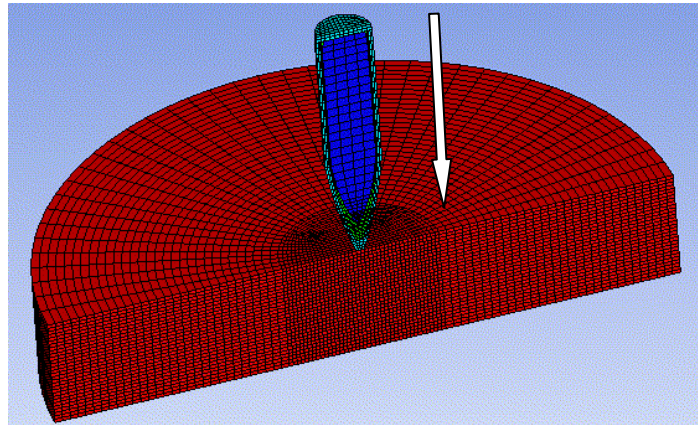
Şekil 7.2.4.3. 3A4 numunesi benzetim sonrası görüntü



Şekil 7.2.4.4. 3A4 sayısal benzetim sonucu oluşan mermi çekirdeği kinetik enerji değişimi

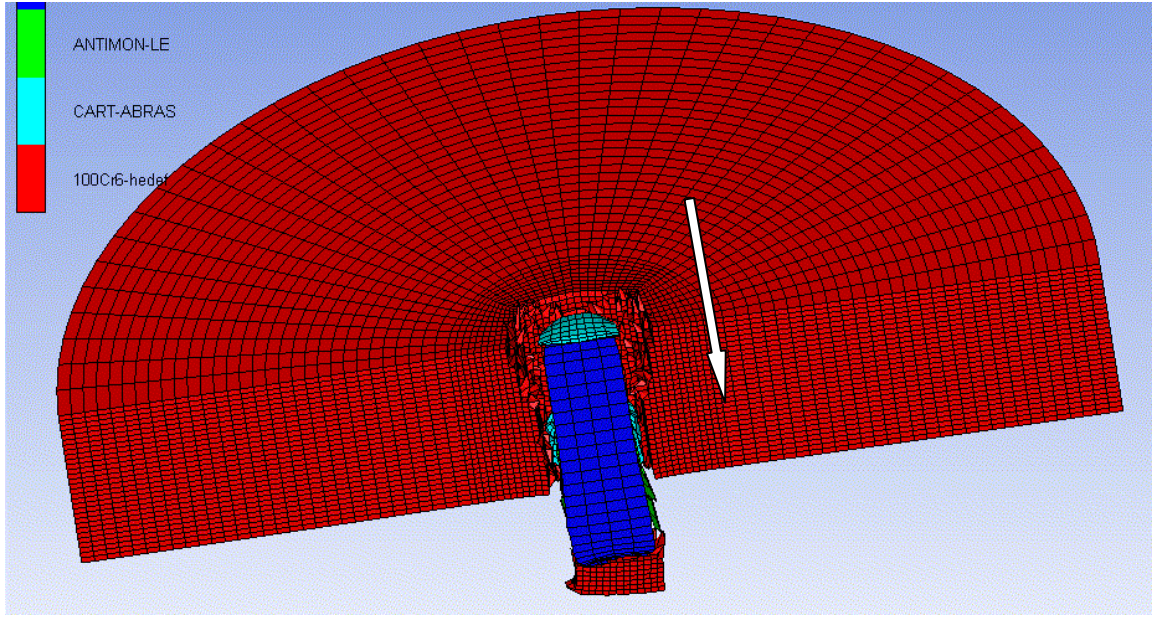
Şekil 7.2.4.3'te görüldüğü üzere 3A numunesinin deformasyonu atışlarla uyumlu çıkmış ve yine beklenildiği gibi hedef plaka delinmiştir. Hedef plakasının davranışı sünek ile gevrek arasında olmakla beraber merminin önünde plug oluşumu göze çarpmıştır.

3A5 hedef plakası için oluşturulan örgü yapısı ve mermi ve plakanın benzetim öncesi görüntüleri Şekil 7.2.4.5'te görülebilir. 5'inci alan yoğunluğu sabit tutularak hesaplanan hedef kalınlığı 14,4 mm olarak alınmıştır.



Şekil 7.2.4.5. 3A5 numunesi sayısal benzetim öncesi görüntü

3A5 numunesinin benzetim sonrası görüntüleri Şekil 7.2.4.6'da verilmiştir. Şekil 5.3.14'te görüldüğü üzere deney sonuçlarına göre plaka delinmezken sayısal benzetim sonucuna göre (Şekil 7.2.4.6) hedef plaka delinmektedir. Bunun sebebi uygulanan kırılma modeli olabilir. Sabit plastik gerinime dayanan kırılma modeli; üç eksenlilik, gerinim hızı, sıcaklık ve benzeri bir çok parametreye dayanan kırılma olgusunu yeteri kadar uygun modelleyememektedir. Kırılma modelinin kullanılmadığı durumda ise hedef plakası plastik olarak uzamakta ve hiçbir zaman kopmadığından gerçekçi olmamaktadır.



Şekil 7.2.4.6. 3A5 numunesi sayısal benzetim sonrası görüntü

Adyabatik Kayma Bantlarının (Bölüm 5.7) anlatıldığı bölümde bahsedildiği gibi 50 HRC ve üzeri sertliklerde bozulmuş bantlara ek olarak dönüşmüş bantlar ortaya çıkmaktadır. Bu durum 3B, 3C ve 3D numuneleri için de geçerlidir. Dönüşmüş bantların yoğunlaşmasıyla aslında yüksek dayanıma sahip malzemeler balistik açıdan yetersiz kalmaktadır. 50 HRC ve üzerinde parçalanmaya başlayan 100Cr6 numuneleri bu duruma en iyi örneği teşkil etmektedir. Mermi çekirdek malzemesi ile aynı olan ve ısıl işlemler sonrası çok yüksek dayanımlara sahip olan bu numuneler balistik olarak başarısızlığa uğramıştır.

Çizelge 7.2.4.1'de gösterdiğimiz malzeme modeli 3B, 3C ve 3D için değiştirilip kullanıldığında bu malzemelerin yüksek hızda deformasyonunda ortaya çıkan dönüşmüş bant özelliğini modelleyememektedir. Bu yüzden parçalanarak başarısız olan bu numune gruplarının sayısal benzetimleri yapılamamıştır.

7.2.5. AA 5083

AA5083 H111 alüminyum alaşımı (5A olarak tanımlanmıştır) için malzeme modeli oluşturulmuştur. Hal denklemi için lineer hal denklemi kullanılmıştır.

Shigley et al'daki [81] tablolarda yer alan verilere göre AA5083 H111 alüminyum alaşımının elastisite modülü 71,2 GPa ve Poisson oranı 0,333'tür.

Literatürde yapılan araştırmada alaşımın H111 koşulu için doyurucu bilgi bulunamadığından dayanım modeli için von Mises dayanım modeli ve kırılma modeli için de plastik gerinim modeli kullanılmıştır. Çizelge 7.2.5.1'de kullanılan malzeme modelleri verilmiştir.

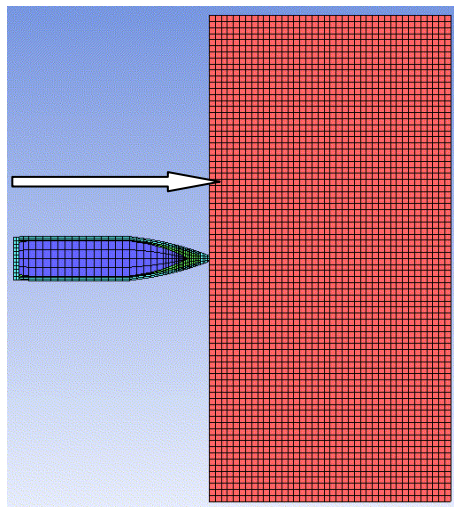
Çizelge 7.2.5.1. AA5083 H111 çeliği için malzeme modeli verileri

Lineer Hal Denklemi	
Referans yoğunluğu	2660 kg/m ³ [3]
Hacim modülü	71,6 GPa
Özısı	900 J/(kg.K) [3]
Termal iletkenlik	120 W/(m.K) [3]
Von Mises Dayanım Denklemi	
Kesme modülü	26,9 GPa
Akma gerilmesi	190 MPa
Gerinim kırılma modeli	
Kırılma gerinimi	0,16

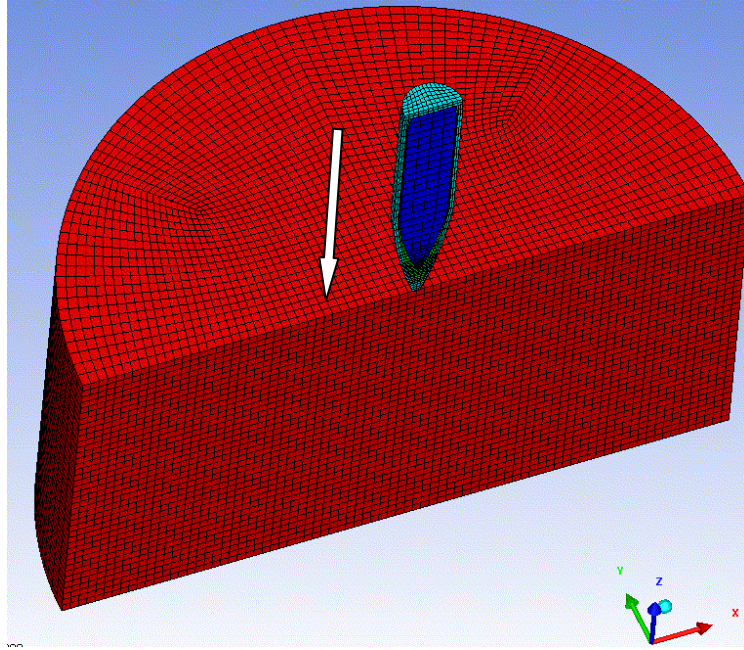
Mermi çarpma hızı 785 m/s olarak alınmıştır. Kullanılan aşınma gerinimi kriteri ise 1.5 artımsal geometrik aşınma gerinimidir.

5A numuneleri için bütün alan yoğunluklarındaki plakalar sünek bir şekilde delindiği için benzetimde plakanın kalınlığı 40 mm olarak alınmıştır. 80 mm çaplı dairesel kesitli plakanın yarısı modellenmiştir. Mermi modelindeki elemanlara büyüklük bakımından yakın olması için kalınlık ve yarıçap boyunca 40'ar eleman kullanılmıştır.

Mermi ve plakanın çarpma anındaki durumları Şekil 7.2.5.1-7'de verilmiştir.

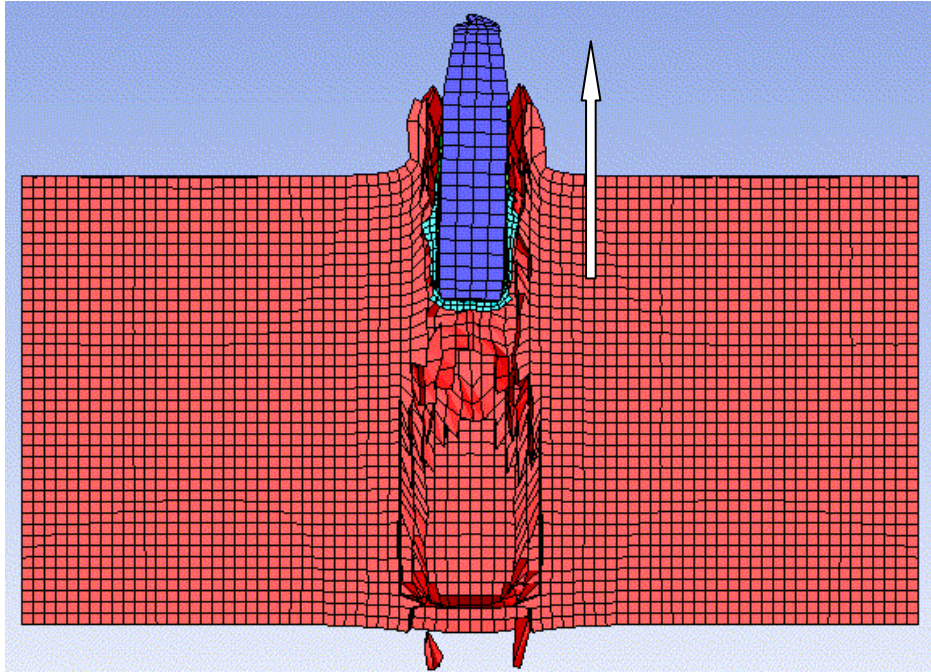


Şekil 7.2.5.1. Plaka ve merminin çarpma anındaki durumu

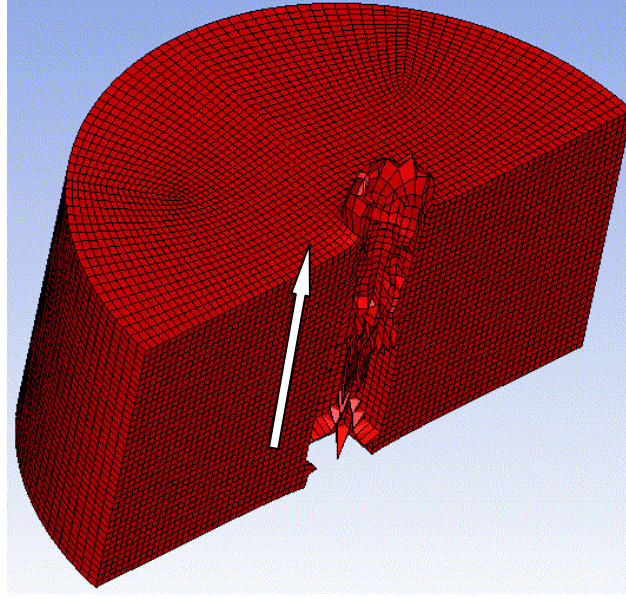


Şekil 7.2.5.2. Plaka ve merminin çarpma anındaki durumu

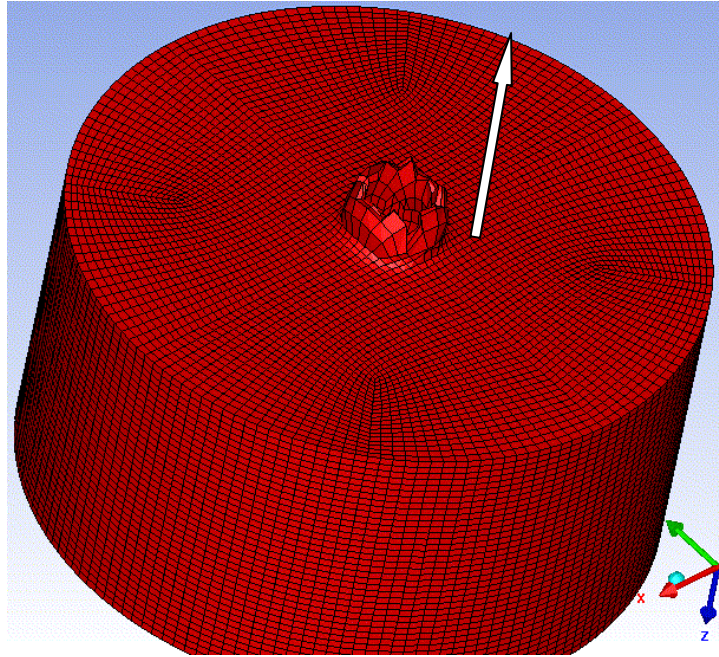
Benzetim **0,09 ms** süresince devam ettirilmiş ve mermi yaklaşık **580 m/s**'lik bir artık hızla plakayı delip geçmiştir. Çıkış anında mermi ve plakanın durumu, plakanın ve merminin benzetim sonrası görüntüleri aşağıda verilmiştir.



Şekil 7.2.5.3. Benzetim sonunda mermi ve plaka

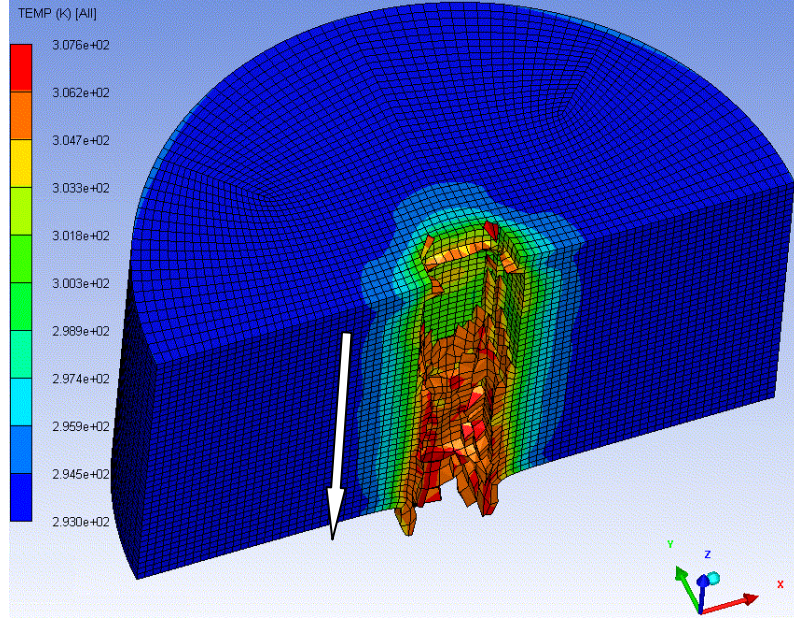


Şekil 7.2.5.4. Plakanın son hali (kesit)



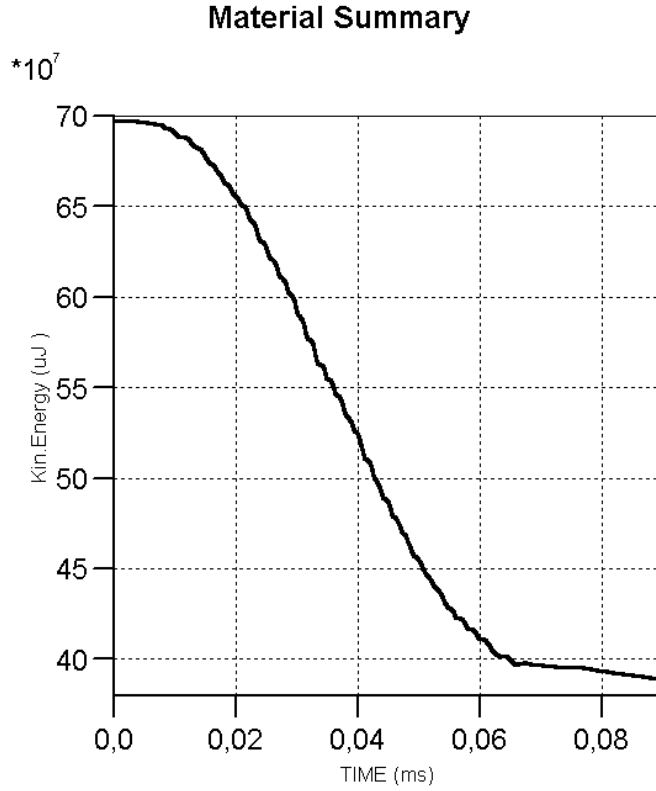
Şekil 7.2.5.5. Plakanın son hali (plakanın arka yüzü)

Yukarıdaki şekillerde görüldüğü gibi plaka sünek bir şekilde delinmiştir. Bu durum deneysel verilerle uyum göstermektedir. Darbe sonrası plaka sıcaklığı ise Şekil 7.2.5.6'de gösterilmiştir.



Şekil 7.2.5.6. Plakanın benzetim sonundaki sıcaklık dağılımları

Merminin kinetik enerji bilançosu incelendiğinde (Şekil 7.2.5.7.), delme işleminin büyük bir kısmının ilk 0,06 ms'de gerçekleştiği ve bu süre içerisinde merminin kinetik enerjisinin yaklaşık %42'sinin harcandığı görülür.



Şekil 7.2.5.7. Merminin kinetik enerji bilançosu (çekirdek malzemesi olan 100Cr6 esas alınmıştır)

7.2.6. AA 7075

AA 7075 malzemesinin T0 temperi (6A) ve T7351 temperi (6C) için yapılması planlanan sayısal benzetim çalışmaları literatürde gerekli malzeme parametreleri bulunamadığından gerçekleştirilememiştir. Bu konuda gerekli açıklama, AISI 4140 başlığı altında detaylı olarak yapılmıştır.

6B kodlu numune (AA 7075-T651) için dayanım modeli olarak Johnson-Cook, hal denklemi olarak doğrusal hal denklemi ve kırılma modeli olarak da Johnson-Cook kırılma modeli kullanılmıştır. Bu modellerde kullanılan parametreler daha önce yayınlanmış makalelerden elde edilmiş [88] [89] ve Çizelge 7.2.6.1'de sunulmuştur.

Benzetim çalışmalarında özel olarak 6B-2 ve 6B-3 numuneleri üzerinde durulmuştur. Bunun nedeni, deneysel çalışmalarda 6B-2 numunesinin delinmesi, 6B-3 numunesinin ise delinmemesidir.

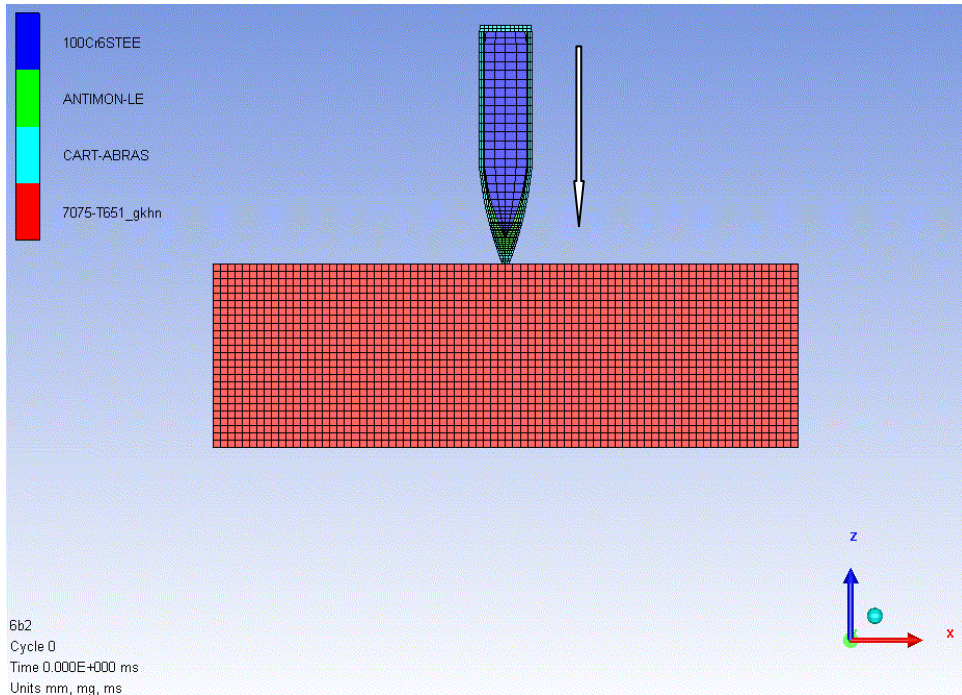
Çizelge 7.2.6.1 6B Numunesi Dayanım Model Parametreleri

MODEL	PARAMETRE	DEĞER
Johnson-Cook Dayanım Modeli	σ_0	336.5 MPa
	B	342.7 MPa
	C	0.01
	m	0.41
	n	1
Doğrusal Hal Denklemi	Referans yoğunluğu	2810 kg/m ³
	Hacim modülü	71 GPa
	Özısı	960 J/kgK
Johnson-Cook Kırılma Modeli	D1	0.14
	D2	0.14
	D3	-1.5
	D4	0.018
	D5	0

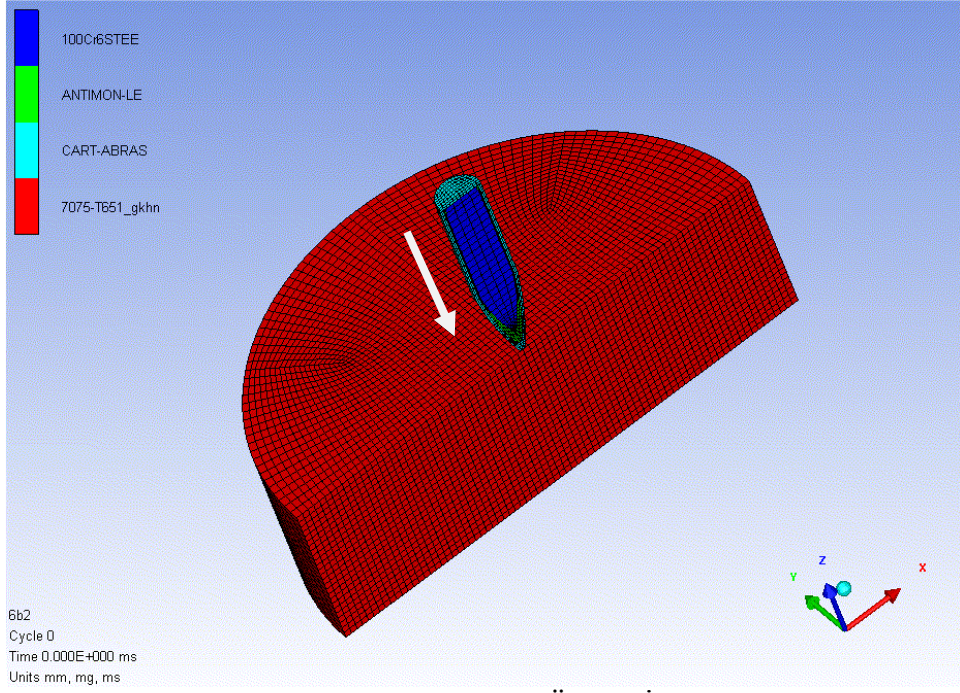
785 m/s ilk hızla gelen merminin, 6B-3 numunesini deldiği ve 260,6 m/s artık hızı kaldığı görülmüştür. Ayrıca mermi çekirdeğinin kinetik enerji değişimi incelendiğinde, kinetik enerjisinde %89,9'luk bir azalma görülmektedir. Deneysel çalışmalarda ise merminin hedef tarafından durdurulduğu görülmüştür. Bu hata payı, malzeme parametrelerinin atış yapılan numunelerden deney yoluyla değil de bir makaleden elde edildiği göz önünde bulundurulduğunda kabul edilebilir düzeydedir. Ayrıca parametrelerin elde edildiği makale [88], AA 7075-T651 malzemesinin parametreleri yerine AA 7039 malzemesinin

parametrelerinin kullanılmasını önermiştir. Bu yaklaşım da ortaya çıkan hata miktarının önemli kaynaklarından biridir.

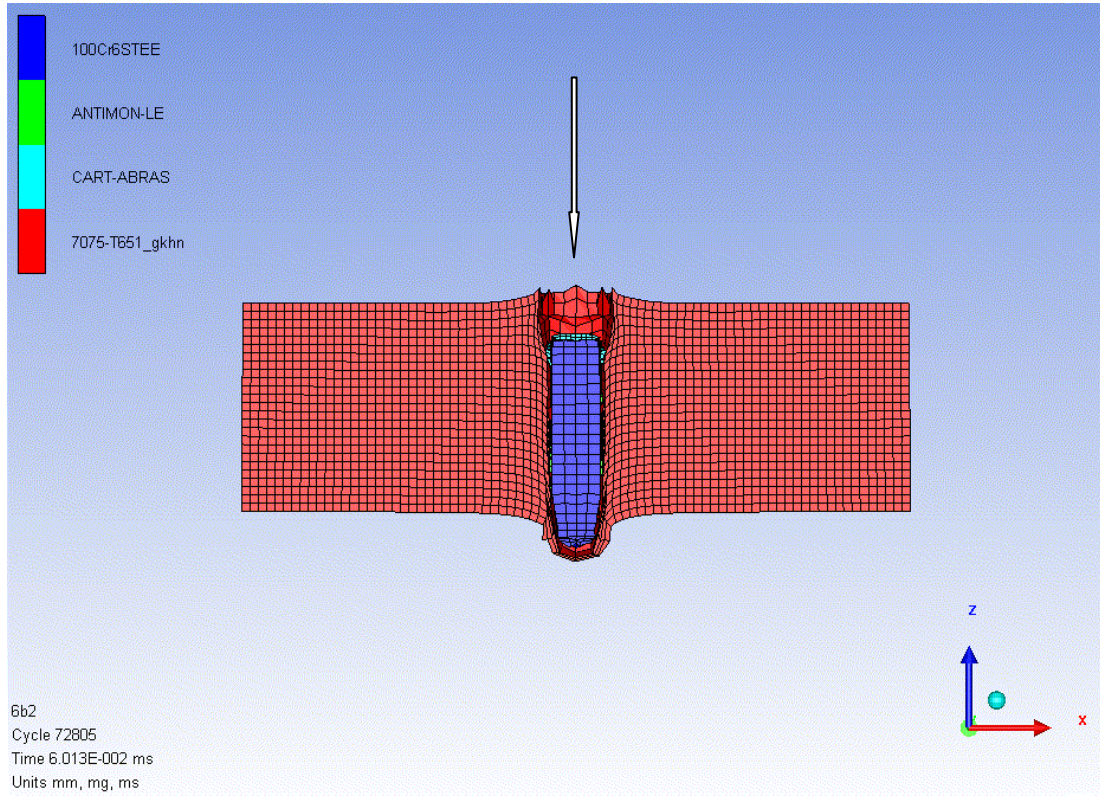
6B-2 numunesi için yapılan benzetim çalışması, analizin sonlarına doğru "time step too small" hatası vererek durmuştur. Bu hata, çözüm ağının fazla deforme olmasından kaynaklanmaktadır ve Lagrange çözücüsünün doğası gereği oluşmaktadır. Ancak hatanın ortaya çıktığı noktada analiz hemen hemen son bulmuş durumdadır (Şekil 7.2.6.3 ve 4) ve merminin yaklaşık 424 m/s artık hızı kalmıştır. Bu artık hız 6B-3 numunesi için ölçülen 260 m/s'lik artık hızdan fazladır. Bu nedenle, 6B-2 numunesi için yapılan benzetimde, beklendiği gibi benzetimde oluşan hataya rağmen, hedef plakasının delineceği anlaşılmıştır. 6B-2 numunesinin deneysel atışlar sonrasında yaklaşık 400 m/s artık hızı kaldığı görülmüştür. Bu artık hız, bilgisayarlı benzetim çalışmalarında elde edilen artık hıza da (424 m/s) son derece yakındır. Bu nedenle 6B-2 numunesinin benzetim sonuçlarının deneylerle uyumlu olduğu anlaşılmaktadır. 6B-2 ve 6B-3 numuneleri için yapılan sayısal benzetim çalışmalarının öncesi ve sonrası Şekil 7.2.6.1-12'da sunulmuştur.



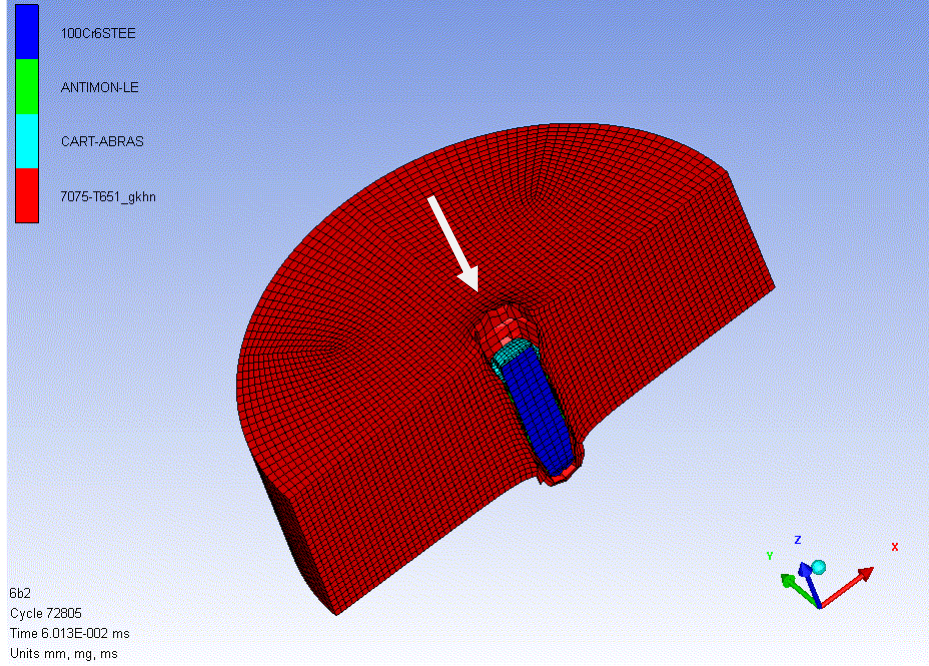
Şekil 7.2.6.1. 6B-2 Numunesinin Atış Öncesi Görünümü



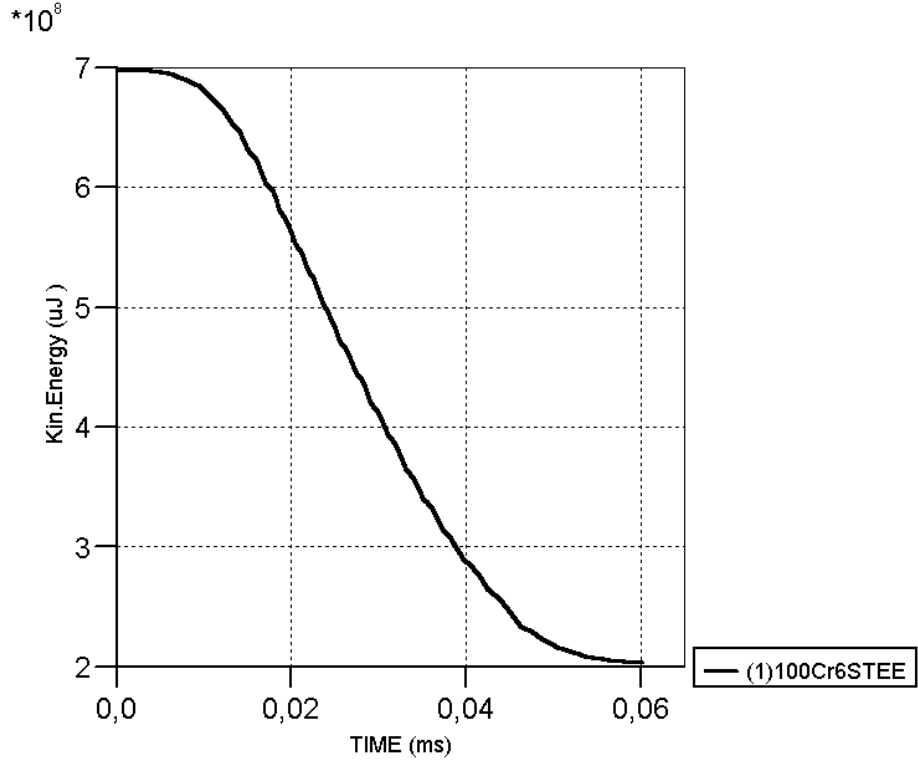
Şekil 7.2.6.2. 6B-2 Numunesinin Atış Öncesi İzometrik Görünümü



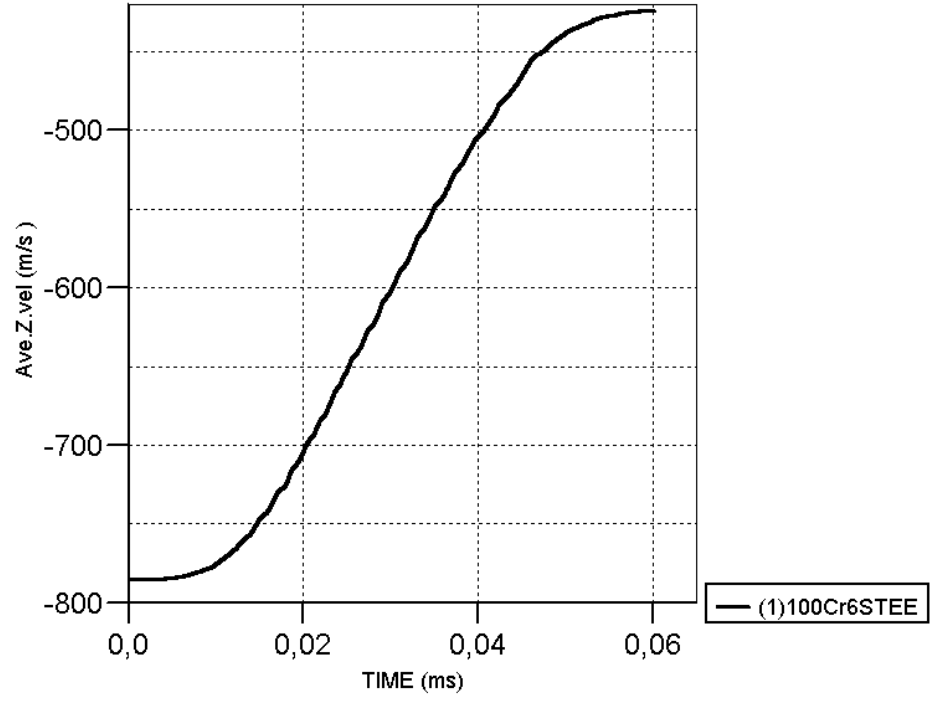
Şekil 7.2.6.3. 6B-2 Numunesinin Atış Sonrası Görünümü



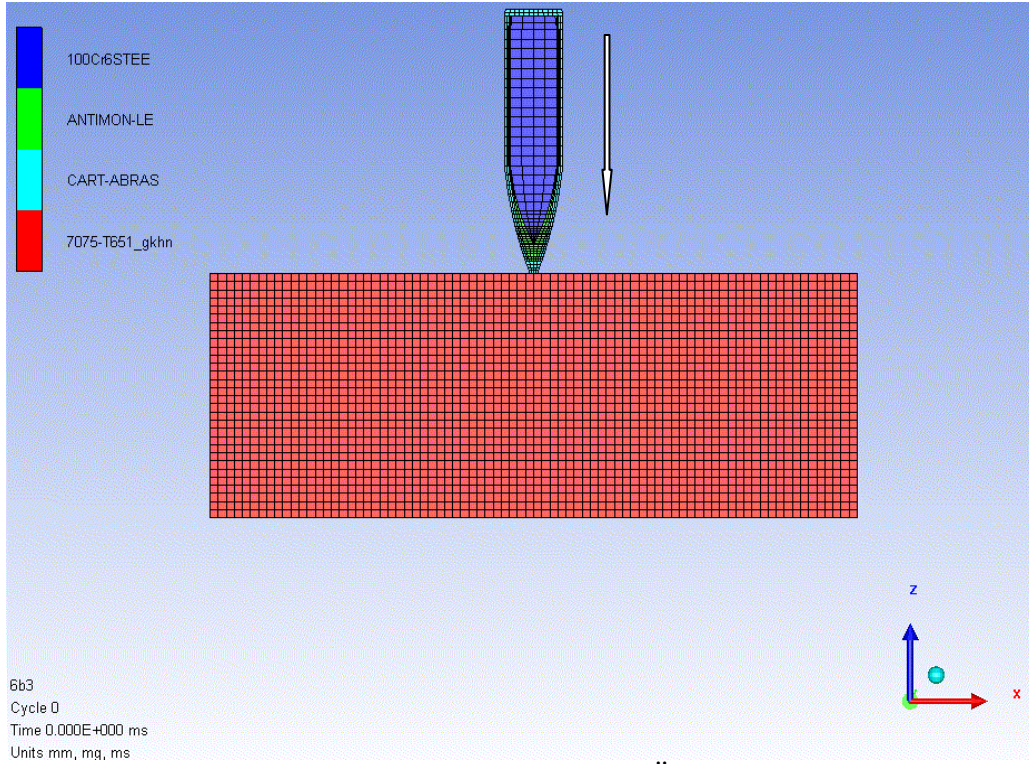
Şekil 7.2.6.4. 6B-2 Numunesinin Atış Sonrası İzometrik Görünümü



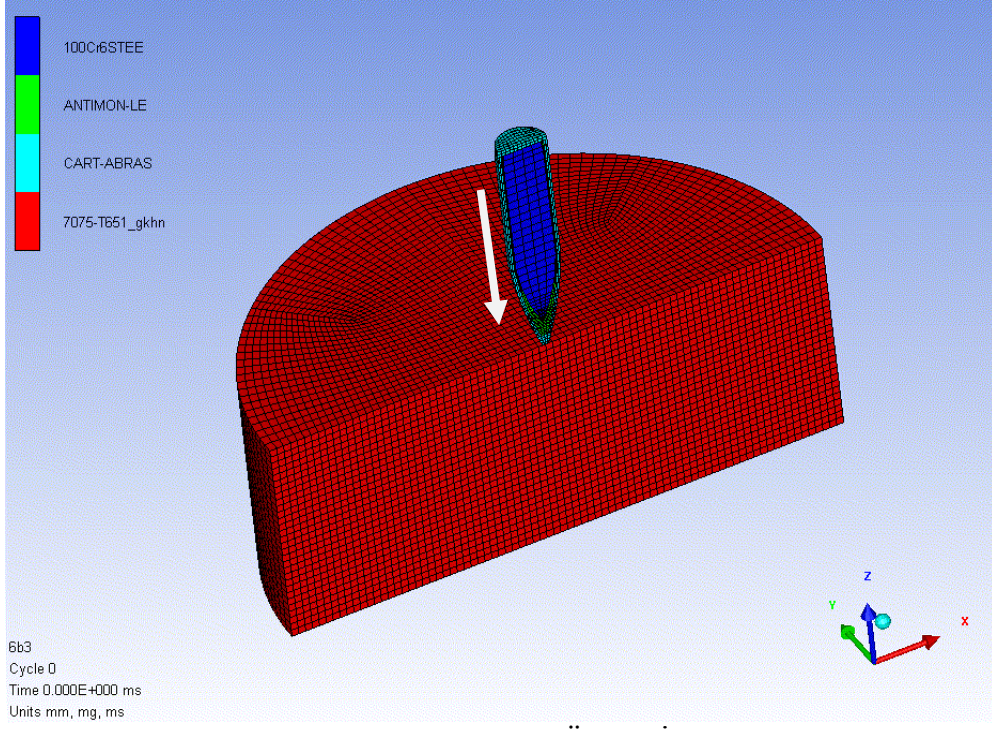
Şekil 7.2.6.5. 6B-2 Modeli, Mermi Çekirdeği Kinetik Enerji Bilançosu



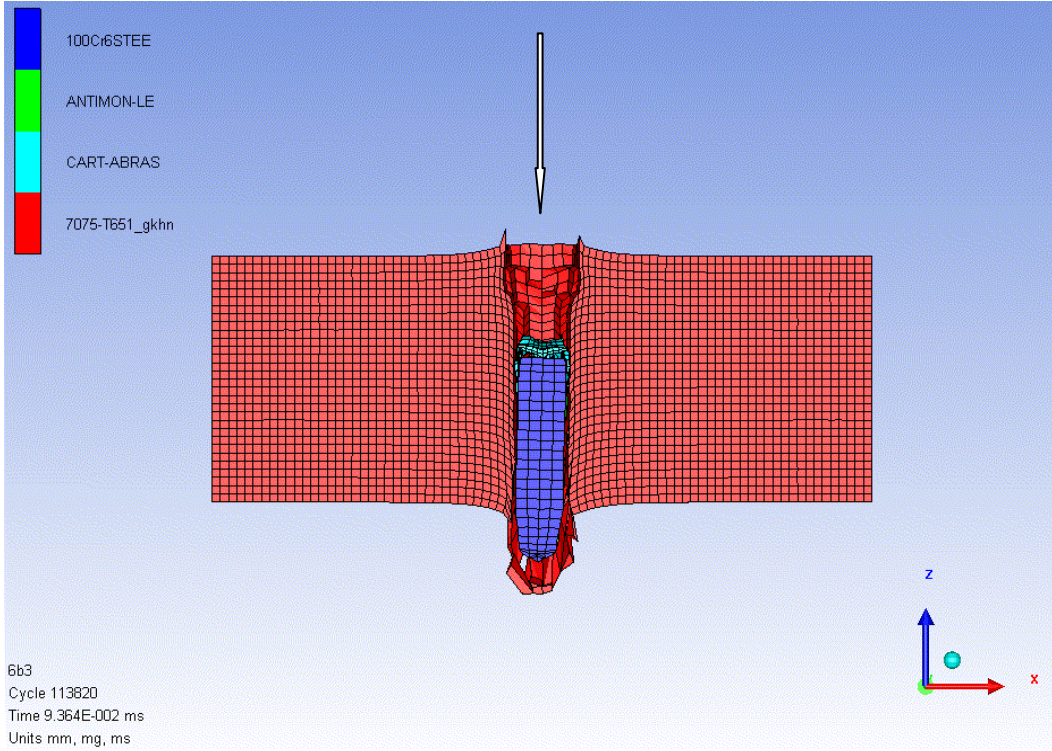
Şekil 7.2.6.6. 6B-2 Modeli, Mermi Çekirdeğinin Ortalama Hızı (Atış -z yönünde yapılmıştır)



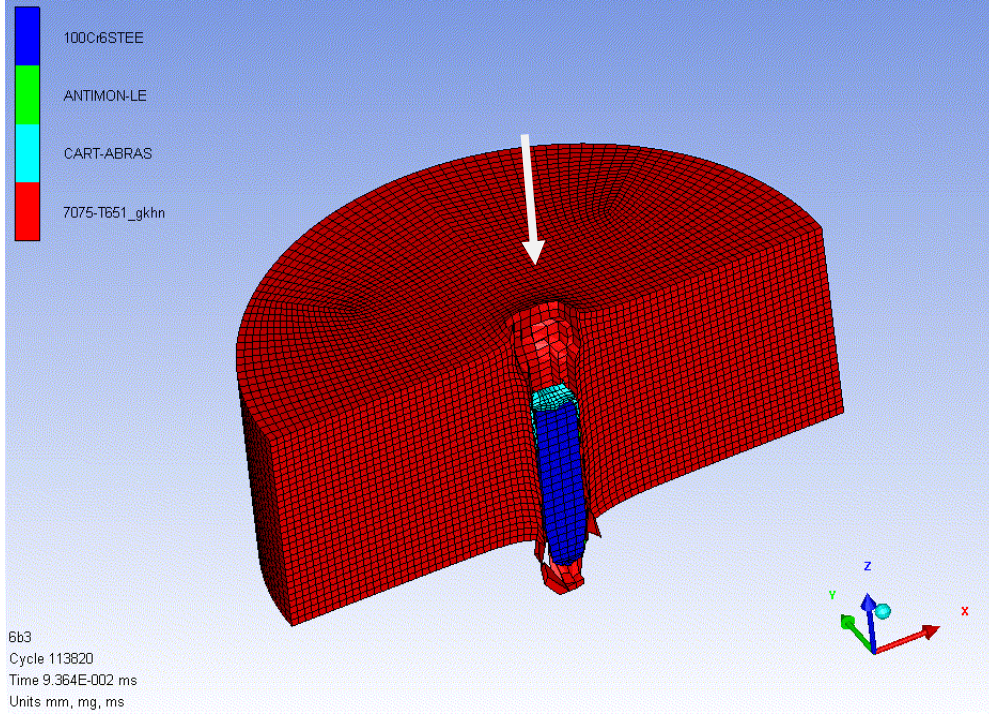
Şekil 7.2.6.7. 6B-3 Numunesinin Atış Öncesi Görünümü



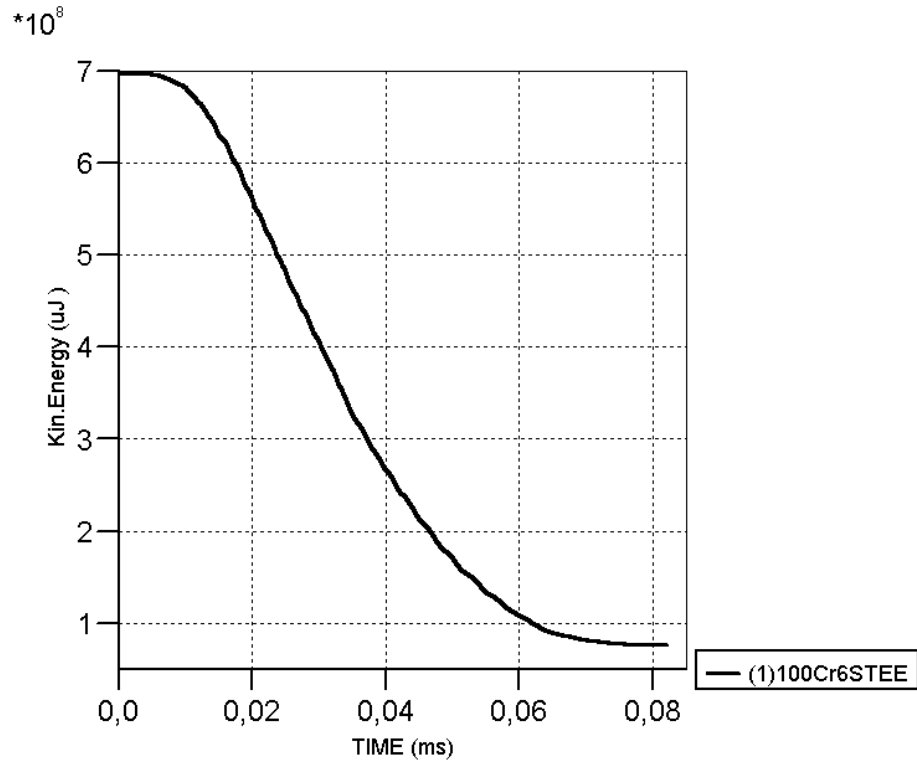
Şekil 7.2.6.8. 6B-3 Numunesinin Atış Öncesi İzometrik Görünümü



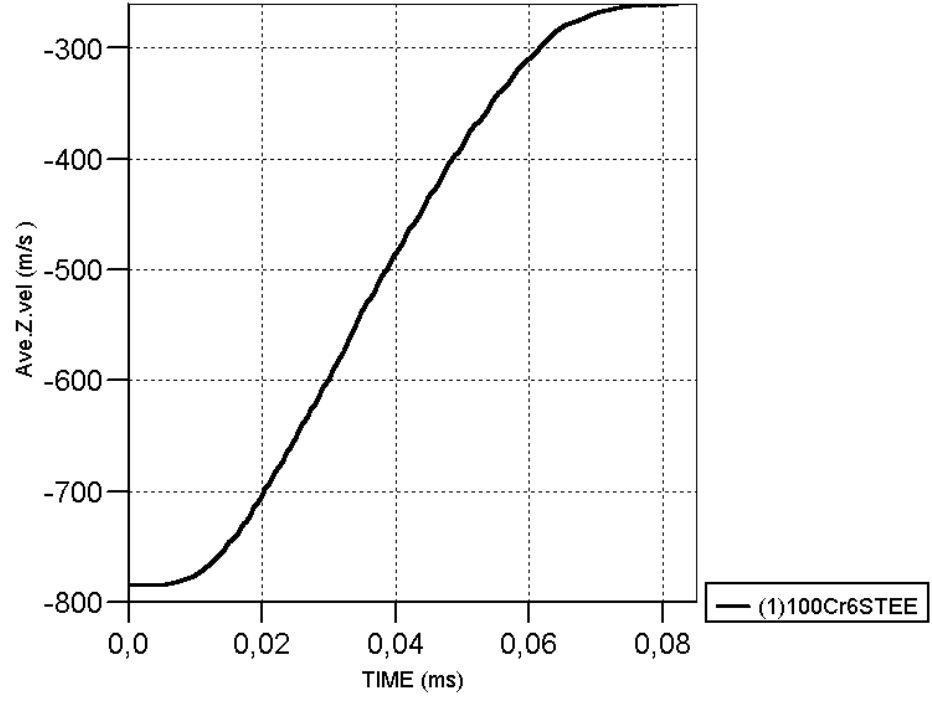
Şekil 7.2.6.9. 6B-3 Numunesinin Atış Sonrası Görünümü



Şekil 7.2.6.10. 6B-3 Numunesinin Atış Sonrası İzometrik Görünümü



Şekil 7.2.6.11. 6B-3 Modeli, Mermi Çekirdeğinin Kinetik Enerji Bilançosu



Şekil 7.2.6.12. 6B-3 Modeli, Mermi Çekirdeğinin Ortalama Hızı (Atış -z yönünde yapılmıştır)

BÖLÜM 8

8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Genel olarak balistik başarımı etkileyen temel etmenler süneklik/tokluk, akma dayanımı, iç yapı, Alan yoğunluğu ve özellikle sertlik olarak sıralanabilir. Sertliği yüksek olan deney numuneleri genel olarak çok iyi başarımlar sergilemesine rağmen sertlik değeri arttıkça artan gevreklik nedeniyle numuneler delinmeye de gevrek kırılmaya uğramaktadır. Bu nedenle sertlikten taviz vermeden toklukta sağlanacak iyileştirmeler numunelerin balistik başarımını önemli ölçüde artırmaktadır. Bununla beraber denenen numuneler için optimum bir sertlik ya da optimum bir yüzde uzama değerinden bahsetmek mümkün değildir. İç yapıda gözlemlenen (çelikler için) Adyabatik Kayma Bantları (AKB) balistik başarımı etkilemektedir. Söz konusu bantlar ile ilgili çalışmalar sınırlıdır. AKB'lerinin davranım şekilleri ve etkileyen etmenler belirlenmeden bir optimumdan söz etmek mümkün olmamaktadır. Ancak incelenen malzemeler için en iyi başarımları gösterenin diğerlerinden üstünlükleri çalışmada sunulmuştur. Bu konu yeni bir araştırma alanı olarak ele alınabilir.

Deneysel çalışmalarda elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- İncelenen malzemeler içinde en iyi balistik başarımı önde seramik katman kullanılan numuneler göstermiştir.
- Seramik ön katman kullanılan numunelerden arka destek katman kalınlığı 50 ve 60 HRC olanları 55 kg/m^2 alan yoğunluğundaki numuneler tam balistik koruma sağlamıştır.
- Yapılan çalışmalar neticesinde Seramik katman kullanılan numunelerde ansızın kırılma gerçekleşmektedir. Metal numunelerde ise numunenin tokluğuna bağlı olarak sünek delinme, çukur tipi delinme ve zımba etkisiyle delinme sünek, yarı sünek ve gevrek malzemeler için sırasıyla görülmektedir. Alüminyum alaşımları için daima sünek delinme gerçekleşirken, Çelikler için 40 HRC üzerindeki numunelerde çukur tipi ve zımba etkisi ile delinme mekanizmaları görülmektedir.
- Katmanlı olarak denenen numuneler haricinde bütüncül malzemelerden en iyi başarımı ~53 HRC sertliğe sahip AISI 4340 numuneleri sergilemiştir.
- Yüksek sertlikli numuneler düşük toklukları nedeniyle ani şekilde kırılmış ve balistik başarımları düşük çıkmıştır.
- Yüksek başarımlar sergilemesi beklenen ve mermi çekirdeği ile aynı malzeme olan 100Cr6 oldukça kötü başarımlar sergilemiştir.

- Seramik takviyeli numuneler zırh çeliğine ve yüksek sertlikli zırh çeliğine oranla sırasıyla %56 ve %48 ağırlıktan kazanç sağlamıştır [6].
- AISI 4340 çeliği ~53 HRC sertlikte zırh çeliğine ve yüksek sertlikli zırh çeliğine oranla sırasıyla %39 ve %29 ağırlıktan kazanç sağlamıştır [6].
- Alüminyum alaşımları içinde en iyi balistik başarımı AA7075 T651 ısıtılma işlem koşulundaki numuneler sergilemiştir.
- Alüminyum alaşımları için sertlik arttıkça belirgin şekilde balistik başarımları artmıştır. Diğer taraftan çelik numuneler için durum belirli bir sertlik değerine kadar aynı şekilde artarken, çok yüksek sertliklere ulaşıldığında başarımları düşmektedir.
- Farklı malzeme grupları için farklı iç yapılar hazırlanarak yapılan araştırmalar neticesinde Çelikler için menevişlenmiş martensit oranı sertlikte 10 HRC'den fazla bir düşüşe neden olmadıkça daha iyi başarımları sağladığı görülmüştür.
- Bu çalışmada askeri zırhlı taşıyıcı ve savunma araçlarındaki zırhtan daha düşük alan yoğunluğunda tam balistik koruma hedeflenmiştir. Bu nedenle başlangıç noktamız haddelenmiş homojen zırh çeliği (RHA) olarak belirlenmiştir. AA 7075 T651 numuneler 380 HB sertliğe sahip RHA çeliğine oranla ~%25 ağırlıktan kazanç sağlamıştır. Diğer taraftan seramik katman kullanılan numunelerde daha iyi balistik başarımları sağlanmasına rağmen çoklu atışa uygun bulunmamıştır. Seramik katman mühimmatı durdurduktan sonra dağılmaktadır. Bu durumda destek katman gelebilecek ikinci bir tehditle karşı karşıya kalmaktadır.
- Balistik deneylerden sonra incelenen içyapılarda çeliklerin tamamında bozulmuş AKB'ları gözlenmiştir. 50 HRC sertliğin üzerindeki sertliklerde ise dönüşmüş bantlar gözlenmiştir.
- Çelikler için yüksek sertlik değerlerine ulaşıldığında malzemelerin gevrekliği artmakta ve yukarıda da belirtildiği gibi AKB oluşumu daha yoğun ve dönüşmüş bantlar şeklinde gerçekleşmektedir. Bu durum da yüksek sertlik değerlerinde çelikler için daha kötü bir balistik başarımları ortaya çıkmaktadır.
- Bantların sertlikleri ana metalin sertliğinden daha yüksek çıkmıştır.
- Dönüşmüş bantlar içinde çok küçük taneler oluşmuş ve çökeltilere rastlanmıştır.
- Geliştirilen analitik modellerle elde edilen sonuçlar deneysel sonuçlarla %90-95 uyum sergilemiştir.

Sayısal benzetim sonuçları göz önüne alındığında:

- Basit bir malzeme modeli kullanılmış olmasına karşın bu model AISI 1050 çeliğinin davranışını yakalamış, aynı zamanda benzetim sonunda gerçeğe yakın mermi artık hızı elde edilmiştir.
- AISI 4140 çeliği için farklı bir ısıl işlem uygulanması ve böyle bir çelik için literatürde herhangi bir çalışma yapılmamış olmasından dolayı malzeme modeli kurgulanamamıştır. Bundan dolayı sayısal benzetimi yapılmamıştır.
- AISI 4340 çeliği için literatürden alınan model ısıl işlem seviyelerine göre değiştirilip kullanılmıştır. Bu malzeme modeli ışığında yapılan atışlar neticesinde ilk iki sertlik için malzeme modeli deneysel verilerle örtüşmüş, fakat üçüncü sertlikten itibaren malzemede dönüşmüş adyabatik kayma bantlarının artmasıyla yüksek dayanım beklenen numunelerin kırılması bilgisayar benzetimlerinde gözlemlenememiştir.
- DIN 100Cr6 malzemesi için birinci sertlikteki malzemenin davranışı sayısal benzetimlerle yakalanırken balistik limit doğru bulunamamış; ikinci sertlikten itibaren ortaya çıkan dönüşmüş bantların varlığı malzemeyi aşırı kırılğan yapmış ve mermi çekirdeği modelinin değiştirilmesi ile oluşturulan malzeme modeli bu davranışı yansıtamamıştır.
- Basit bir malzeme modeli kullanılmış olmasına karşın AA5083 malzemesi için sayısal benzetim sonuçları deneysel verilerle uyumuştur. Bu model malzemenin davranışını yakalamıştır.
- AA7075 malzemesinin ikinci sertlik değeri için literatürden bulunan malzeme modeli kullanılmıştır. Bu malzeme modeli ile yapılan sayısal benzetimler neticesinde malzeme davranışı başarı ile yakalanırken balistik limit doğru bir şekilde belirlenememiştir. Diğer ısıl işlem koşulları için ise malzeme modeli bulunamadığından sayısal benzetim yapılmamıştır.

Sayısal benzetim çalışmalarında literatürden derlenen malzeme modelleri kullanılmıştır. Bu modellerle genelde sünek malzeme davranışı başarıyla yakalanmış, balistik limit değerleri deney sonuçlarına uygun bulunmuştur. Fakat malzeme sertleştikçe ve dönüşmüş adyabatik kayma bantlarının yoğunluğu arttıkça malzemeler kırılğanlaşmış, malzeme modelleri bu davranışı yansıtamamışlardır.

Öneriler:

- Temiz çelik üretim yöntemleri kullanılarak üretilecek çelikler denenebilir.

- Katmanlı kompozitler ile ilgili daha çok enerji soğurabilecek alüminyum köpük gibi arka katman malzemeleri denenebilir.
- En az sertlik kadar önemli bir etmen olan tokluğun avantajından faydalanılabilir.
- Çift fazlı bölgede ısı işlem yapmaya uygun çelikler kullanılarak yüksek sertlikli ön yüz ve göreceli olarak yüksek tokluklu iç bölgelere sahip zırhlar denenebilir.
- Boşluklu zırh çalışmaları yapılabilir.
- Metal zırhlar arasında enerji soğurma kapasitesi yüksek malzemeler denenebilir
- Seramiklerin tokluklarını artırmak için seramik ya da elyaf takviyeli seramik esaslı kompozitler denenebilir.

KAYNAKLAR

- [1] Robinson H.R., *Oriental armour.*, Walker, New York, (1967).
- [2] Übeyli M., Demir T., *Hava araçları için seramik zırh uygulamaları.*, VI Havacılık sempozyumu (HASEM'06) bildirileri kitabı, 67-71, Kayseri, (2006).
- [3] Thomas J.H., "*Elements of Ordnance*", John Wiley & Sons, Inc., New York, (1938).
- [4] Lowry E.D., "*Interior Ballistics*", New York, Doubleday & Company, (1968).
- [5] Zukas J.A., Nicholas T., Swift H.F., Greszczuk L.B., Curran D., "*Impact Dynamics*", pp. 155-214, John Wiley & Sons, Inc., New York, (1982).
- [6] Orgorkiewicz RM. Armor for combat vehicles. New Armor Materials, 36-42 *Mach Des* (1969).
- [7] Woodward RL. A rational basis for the selection of armour materials. *The J of Aust Inst of Metals*; 22, 167-170, (1977).
- [8] Manganello J, Abbott KH. Metallurgical factors affecting the ballistic behavior of steel targets. *J of Mater JMLSA*, 17, 231-239, (1972).
- [9] Gupta NK, Madhu V. An experimental study of normal and oblique impact of hard-core projectile on single and layered plates. *Int J of Impact Eng* 19, 395-414, (1997).
- [10] Dikshit SN, Kutumbarao VV, Sundararajan G, The influence of plate hardness on the ballistic penetration of thick steel plates. *Int J of Impact Eng*, 16(2), 293-320, (1995).
- [11] Sorensen BR, Kimsey KD, Silsby GF, Scheffler DR, Sherrick TM, De Rosset WS. High velocity penetration of steel targets. *Int J of Impact Eng*, 11(1), 107-119, (1991).
- [12] Lach E., Koerber G, Scharf M, Bohmann A. Comparison of nitrogen alloyed austenitic steels and high strength armor steels impacted at high velocity. *Int J of Impact Eng*, 23, 509-517, (1999).
- [13] Gupta NK, Madhu V. Normal and oblique impact of a kinetic energy projectile on mild steel plates. *Int J of Impact Eng*, 12 (3), 333-343, (1991).
- [14] Reddy GM, Mohandas T, Papukutty KK. Effect of welding process on the ballistic performance of high-strength low-alloy steel weldments. *J of Mater Process Technol*, 74, 27-35, (1998).
- [15] Anderson Jr CE, Hohler V, Walker JD, Stilp AJ. The influence of projectile hardness on ballistic performance. *Int J of Impact Eng*, 22, 619-632, (1999).
- [16] Edwards MR, Mathewson A. The ballistic properties of tool steel as a potential improvised armour plate. *Int J of Impact Eng*, 19(3), 297-309, (1997).
- [17] Übeyli M, Yıldırım RO, Ögel B. On the comparison of the ballistic performance of steel and laminated composite armors. *Materials & Design*, Volume 28(4), 1257-1262, (2007).
- [18] Übeyli M, Yıldırım O, Ögel B., Investigation on the ballistic behavior of Al₂O₃/Al₂O₂₄ laminated composites. *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 196(1-3), 356-364, (2008).
- [19] S. Dey, T. Borvik, O.S. Hopperstad, J.R. Leinum, M. Langseth, *Int. J. of Impact Eng.* 30, 1005-1038, (2004).
- [20] S. Dey, T. Borvik, X. Teng, T. Wierzbicki, O.S. Hopperstad, *Int. J. of Solids Struct.* 44, 6701-6723, (2007).
- [21] T. Borvik, M. Langseth, O.S. Hopperstad, K.A. Malo, *Int. J. of Impact Eng.* 22, 855-886, (1999).
- [22] K. Mawaja, W. Stumpf, Fracture and Ballistic induced phase transformation in tempered martensitic low-carbon armour steels, *Materials Science and engineering A*, 432, 158-169, (2006).

- [23] K. Maweja, W. Stumpf, The design of advanced performance high strength low-carbon martensitic armour steels Part1. Mechanical property considerations, *Materials Science and Engineering A*, (2007) (in press).
- [24] K. Maweja, W. Stumpf, The design of advanced performance high strength low-carbon martensitic armour steels Microstructural considerations, *Materials Science and Engineering A*,(2007) (in press)
- [25] Tan V.B.C., Khoo K.J.L., Perforation of flexible laminates by projectiles of different geometry. *Int. J. Impact Eng.* 31, 793-810, (2005).
- [26] Findik F., Tarim N., Ballistic impact efficiency of polymer composites. *Composite Structures* 61, 187-192, (2003).
- [27] Findik F., Tarim N., Ballistic impact performance of composite structures. *Composite Structures* 56, 13-20, (2002).
- [28] DeLuca E., Prifiti J., Betheney W., Chou S.C. Ballistic impact damage of S-2 glass-reinforced palstic structural armor. *Composites science and tech.* 58, 1453-2461, (1998).
- [29] Tan V.B.C. et al., Sterngthening fabric armour with silica colloidal suspensions. *Int. J. Solids and Structures.* 42, 1561-1576, (2005).
- [30] Cork C.R., Foster P.W., The ballistic performance of narrow fabrics. *Int. J. Impact Eng.* (in press)
- [31] Cheesman B.A., Bogetti T.A., Ballistic impact into fabric and complaint composite laminates. *Composite Structures* 61, 161-173, (2003).
- [32] Bourne N.K., On the impact and penetration of soda-lime glass. *Int. J. Impact Eng.* 32, 65-79, (2005).
- [33] Horsfall I., Austin S.J., Bishop W., Structural ballistic armour for transport aircraft. *Materials and Design* 21, 19-25, (2000).
- [34] Wang B., Chou S.M., The behaviour of laminated composite plates as armour. *J. Materials processing Tech.* 68, 279-287, (1997).
- [35] Hetherington J.G., Rajagopalan B.P., An investigation into the energy absorbed during ballistic perforation of composite armours. *Int. J. Impact Eng.* 11, 33-40, (1991).
- [36] Karamis M.B., Nair F., Tasdemirci A., Failure and tribological behaviour of the AA5083 and AA6063 composites reinforced by SiC particles under ballsitic impact. *Composites: Part A* 34, 217-226, (2003).
- [37] Navarro C., et al., The effect of the thickness of the adhesive layer on the ballistic limit of ceramic/metal armours. An experimental and numerical study. *Int. J. Impact Eng.* 32, 321-336, (1999).
- [38] Rosenberg Z., et al., Ricochet of 0.3” AP projectile from inclined polymeric plates. *Int. J. Impact Eng.* 31, 221-233, (2005).
- [39] Hohler V., et al., Comparative analysis of oblique impact on ceramic composite systems. *Int. J. Impact Eng.* 26, 333-344, (2001).
- [40] Sadanandan S., Heterington J.G.,Characterisation of ceramic/steel and ceramic/aluminum armours subjected to oblique impact. *Int. J. Impact Eng.* 19, 811-819, (1997).
- [41] Alves A.L.S., et al., Influence of weathering and gamma irradiation on the mechanical and ballistic behaviour of UHMWPE composite armor. *Polymer Testing* 24, 104-113, (2005).
- [42] Forquin P., et al., Effect of aluminum reinforcement on the dynemic fragmentation of SiC ceramics. *Int. J. Impact Eng.* 28, 1061-1076, (2003).
- [43] Übeyli M., Yıldırım R.O., Ögel B., On the optimization of the ballistic performance of steel and laminated composite armors. *Materials & Design*, Volume 28 (4), 1257-1262, (2007).

- [44] Wilkins M. L., Mechanics of penetration and perforation. *Int. J. Eng. Sciences* 16, 793-807, (1978).
- [45] Woodward R.L., A simple one-dimensional approach to modelling ceramic composite armour defeat. *Int. J. Impact Eng.* 9, 455-473, (1990).
- [46] Al-Qureshi H.A., et al., Analysis and investigation of ballistic impact on the ceramic/metal composite armour. *Int. J. Machine tools and Manufacture* 44, 307-316, (2004).
- [47] Petterson A., et al., Titanium-titanium diboride composites as part of a gradient armour material. *Int. J. Impact Eng.* 32, 389-399, (2005).
- [48] Reaugh J.E., et al., Impact studies of five ceramic materials and pyrex. *Int. J. Impact Eng.* 23, 771-782, (1999).
- [49] Madhu V., et al., An experimental study of penetration resistance of ceramic armour subjected to projectile impact. *Int. J. Impact Eng.* 32, 337-350, (2005).
- [50] Horsfall I., Glass ceramic armour systems for light armour applications. 19th Int. Semp. of Ballistics, Interlaken, Switzerland, 7-11 May 2001.
- [51] Nair F., et al. Surface characteristics of projectiles after frictional interaction with metal matrix composites under ballistic condition. *Wear* 261, 738-745, (2006).
- [52] Karamis M.B., Nair F., Tasdemirci A., Analyses of metallurgical behaviour of Al-SiCp composites after ballistic impacts. *Composites Structures* 64, 219-226, (2004).
- [53] Gama B.A., et al., Aluminum foam integral armor: a new dimension in armor design. *Composite Structures* 52, 381-395, (2001).
- [54] Sun T.C., Roeder B.A., Dynamic penetration of alumina/aluminum laminates: experiments and modeling. *Int. J. Impact Eng.* 25, 169-185, (2001).
- [55] Florance L., Interaction of projectiles and composite armour. Part II Stanford research ins. Menlo park. California, USA., (1969).
- [56] Hetherington J.G., The optimization of two component composite armours. *Int. J. Impact Eng.* 12, 409-414, (1992).
- [57] Wang B., Lu G., On the optimisation of two-component plates against ballistic impact. *J. Materials Processing Tech.* 57, 141-145, (1996).
- [58] Lee M., Yoo Y.H., Analysis of ceramic/metal armour systems. *Int. J. Impact Eng.* 25, 819-829, (2001).
- [59] Fawaz Z., Behdian K., Xu Y., Optimum design of two-component composite armours against high-speed impact. *Composite Structures* 73, 253-262, (2006).
- [60] Elperin T., Ben-Dor G., Dubinsky A., Optimization of two-component composite armor against ballistic impact. *Composite Structures* 69, 89-94, (2005).
- [61] Boccaccini A.R., et al., Fracture behaviour of mullite fibre reinforced-mullite matrix composites under quasi-static and ballistic impact loading. *Composites Science and Tech.* 65, 325-333, (2005).
- [62] Roberts J.C. et al., Computational and experimental models of the human torso for non-penetrating ballistic impact. *J. Biomechanics*, (2007) (in press).
- [63] ASTM Standards, Designation E 8M-93, Standard test methods for tension testing of metallic materials; (1993).
- [64] ASTM Standards, Designation E 10-84, Standard test method for brinell hardness of metallic materials; (1984).
- [65] ASTM Standards, Designation E 18-93, Standard test methods for rockwell hardness and rockwell superficial hardness of metallic materials; (1993).
- [66] MIL-C-60617A, Military Specification, Cartridge, 7.62 mm: NATO, Armor Piercing, M61, (1991).

- [67] Übeyli M., (Doktora Tezi), A comparison of ballistic behavior of steel and laminated composite armors, O.D.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara (2005).
- [68] C. Zener C, J.H. Hollomon, *Journal of Applied Physics*, 15, 22, (1944).
- [69] R. Dornmeval, The adiabatic shear phenomenon in Materials at High Strain Rates, (Ed. T.Z. Blazynski), *Elsevier Applied Science*, (1987).
- [70] K.E. Aeberli, P.L. Pratt, *J. Mater. Sci.* 20, 316, (1985).
- [71] H.C. Rogers, *Ann Rev Mater Sci* 9, 283, (1979).
- [72] S.J. Manganello, K.H. Abbott, *J. Mater* 7, 231, (1972).
- [73] Corbett, G. G., Impact loading of plates and shells by free-flying projectiles: a review, *International journal of impact engineering*, 18 (2), 141-230, (1996).
- [74] Woodward, R. L., A rational basis for the selection of armour materials, *The Journal of Australian Institute of Metals*, 22, 167-170, (1977).
- [75] Gupta, N. K. ve Mahdu, V., An experimental study of normal and oblique impact of hard-core projectile on single and layered plates, *International journal of impact engineering*, 19 (5-6), 395-414, (1997).
- [76] Gupta, N. K. ve Mahdu, V., Normal and oblique impact of a kinetic energy projectile on mild steel plates., *International journal of impact engineering*, 12 (3), 333-343, (1992).
- [77] Thompson, W. T., An approximate theory of armour penetration, *International Journal of Applied Physics*, 26 (1), 80-82, (1995).
- [78] Borvik, T., Ballistic penetration of steel plates, *International Journal of Impact Engineering*, 22, p.855-866, (1999).
- [79] Borvik, T., On the ballistic resistance of double-layered steel plates-an experimental and numerical investigation, *International Journal of Solids and Structures*, 44, p.6701-6723, (2007).
- [80] Bilici, M. A., (Doktora Tezi) An Investigation On The Ballistic Behaviour of Alumina/Aluminium Armor Structures, , ODTÜ, Makine Mühendisliği Bölümü, (2007).
- [81] J. E. Shigley, C. R. Mischke, R. G. Budynas, "Mechanical Engineering Design", 7th edition, McGraw-Hill
- [82] http://www.engineersedge.com/properties_of_metals.htm, son ziyaret tarihi 15.07.08
- [83] ASM Handbook Vol.2, Properties and Selection : Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials, American Society for Metals, 2nd printing (1992)
- [84] T. H. Lee, (Doktora Tezi) "An Experimental and Theoretical Investigation for the Machining of Hardened Alloy Steels", , New South Wales Üniversitesi, Avustralya, (2007)
- [85] A.J. Haglund, H.A. Kishawy, R.J. Rogers, "An Exploration of Friction Models for the Chip-tool Interface Using an Arbitrary Lagrangian-Eulerian Finite Element Model", *Wear* 265, pp. 452-460, (2008)
- [86] J-L. Bacaria, O. Dalverny, S. Caperaa, "A Three-Dimensional Transient Numerical Model Of Milling", *Proc Instn Mech Engrs* Vol 215 Part B, (2001)
- [87] [4] B. Banerjee, "The Mechanical Threshold Stress model for various tempers of AISI 4340 steel", *International Journal of Solids and Structures* 44, pp. 834-859, (2007).
- [88] M. N. Raftenberg, "AShear Banding Model for Penetration Calculations", *International Journal of Impact Engineering* 25, pp. 123-146, (2001).
- [89] Y. Yang, Y. Zeng, Z. W. Gao, "Numerical and Experimental Studies of Self-Organization of Shear Bands in 7075 Aluminium Alloy", *Material Science and Engineering* 496, pp. 291-302, (2008).

TÜBİTAK
PROJE ÖZET BİLGİ FORMU

Proje No: 106 M 211
Proje Başlığı: Metal Zırh Malzemelerin Balistik Performanslarının Araştırılması
Proje Yürütücüsü ve Araştırmacılar: Prof. Dr. R. Orhan YILDIRIM (yürütücü), Prof. Dr. Bilgehan ÖGEL (araştırmacı), Doç. Dr. Mustafa ÜBEYLİ (araştırmacı)
Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi: ODTÜ BİLTİR Merkezi. ORTADOĞU TEKNİK ÜNİVERSİTESİ 06531 ANKARA/ TÜRKİYE
Destekleyen Kuruluş(ların) Adı ve Adresi:
Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri: 01/09/2006-01/09/2009
Öz Bu çalışmada, bazı çelikler, alüminyum alaşımları ve katmanlı kompozitlerin 7,62 mm'lik zırh delici mermiler karşısındaki balistik başarımları incelenmiştir. Çelik numuneler dört farklı ısıl işlem, alüminyum alaşımı ise üç farklı ısıl işlem koşulunda denenmiştir. Hedef kalınlığının balistik başarıma etkisi araştırılmıştır. Deneylemlerden sonra numunelerin makro ve mikro hasar mekanizmaları incelenerek balistik başarımları etkileyen etmenler belirlenmiştir. Literatürden bulunan malzeme modelleri kullanılarak atışların sayısal benzetimleri bir hidrokod yazılımı vasıtasıyla gerçekleştirilmiş ve sonuçlar deneylemlerle karşılaştırılmıştır.
Anahtar Kelimeler: Balistik deney, Zırh delici mermi, Zırh malzemeleri.
Fikri Ürün Bildirim Formu Sunuldu mu? Evet <input type="checkbox"/> Gerekli Değil <input checked="" type="checkbox"/> Fikri Ürün Bildirim Formu'nun tesliminden sonra 3 ay içerisinde patent başvurusu yapılmalıdır.
Projeden Yapılan Yayınlar: <u>Uluslar arası hakemli dergilerde yayınlanan (SCI ve/veya SCI-E tarafından Taranan Dergilerde)</u> 1) Übeyli, M., Demir, T., Yıldırım R.O., Aycan, M.F., Effect of Heat Treatment on The Formation of Adiabatic Shear Bands in High Strength Steels Impacted by AP Projectiles. Kovove Materialy, Metallic Materials. 47, 409-413, 2009. 2) Demir, T., Übeyli, M., Yıldırım, R.O., Investigation on the ballistic impact behavior of various alloys against 7.62 mm armor piercing projectile, Materials & Design, 29 (10), 2009-2016, 2008.

3) Demir, T., Übeyli, M., Yıldırım, R.O., Effect of hardness on the ballistic impact behavior of high strength steels against 7.62 mm armor piercing projectiles, Journal of Materials Engineering and Performance,18:145-153 (2009).

4) Demir, T., Übeyli, M., Yıldırım, R.O., Karakaş, S., Response of alumina/4340 steel laminated composites against the impact of 7.62 mm armor piercing projectiles. Science and Engineering of Composite Materials, 16: 89-96(2009).

5) M. Übeyli, T. Demir, H. Deniz, R. O. Yıldırım, Ö. Keleş, Investigation on the ballistic performance of a dual phase steel against 7.62 mm AP projectile, Materials Science and Engineering A (Baskıda, 2009).

Uluslar arası Konferans Bildirileri

6) Demir, T., Übeyli, M., Yıldırım, R.O., Karakaş, M.S. Investigation on The Ballistic Performance of Alumina/4340 Steel Laminated Composite Armor Against 7.62 mm Armor Piercing Projectiles, METAL 2008, Hradec nad Moravici, Czech Republic 13-15,May,2008.

7) Demir, T., Übeyli M., Yıldırım RO. Effect of aging treatment on the ballistic behavior of aluminum alloy 7075 against 7.62 mm armor piercing projectiles, "The Seventh International Scientific-Practical Conference, Research, Development and Application of High Technologies in Industry" pp. 42-45, 28-30 April 2008, Saint Petersburg, Russian Federation.

Tezler:

8) Demir, T., "Investigation on the ballistic performance of metallic and laminated composite materials against 7.62 mm armour piercing projectiles," Yüksek Lisans Tezi, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü (Danışman: Mustafa ÜBEYLİ), Ağustos 2008.

9) Deniz, H., "Ballistic behavior of dual phase steels against armour piercing projectiles" Yüksek Lisans Tezi, Gazi University, Mechanical Engineering, (İkinci Danışman: Mustafa ÜBEYLİ) Haziran 2009.