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

POLİÜRE KAPLI KOMPOZİT PLAKALARIN BALİSTİK PERFORMANSLARININ ARAŞTIRILMASI

Hazırlayan
Cemile Şeyda YARDIM

Danışman
Dr. Öğr. Üyesi Umut ÇALIŞKAN
İkinci Danışman
Doç. Dr. Murat AYDIN

Yüksek Lisans Tezi

Mayıs 2023
KAYSERİ

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

POLİÜRE KAPLI KOMPOZİT PLAKALARIN BALİSTİK PERFORMANSLARININ ARAŞTIRILMASI

(Yüksek Lisans Tezi)

Hazırlayan
Cemile Şeyda YARDIM

Danışman
Dr. Öğr. Üyesi Umut ÇALIŞKAN
İkinci Danışman
Doç. Dr. Murat AYDIN

Bu çalışma, Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından FYL-2022-11925 kodlu proje ile desteklenmiştir.

Mayıs 2023
KAYSERİ

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK

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

Cemile Şeyda YARDIM

İmza

"**Poliüre Kaplı Kompozit Plakaların Balistik Performanslarının Araştırılması"** adlı Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi Lisansüstü Tez Önerisi ve Tez Yazma Yönergesi' ne uygun olarak hazırlanmıştır.

Hazırlayan	**Danışman**
Cemile Şeyda YARDIM	Dr. Öğr. Üyesi Umut ÇALIŞKAN
İmza	

Makine Mühendisliği ABD Başkanı

Prof. Dr. S. Orhan AKANSU

İmza

TEŞEKKÜR

"Poliüre Kaplı Kompozit Plakaların Balistik Performanslarının Araştırılması" adlı tez çalışmamın seçiminde, yürütülmesinde, sonuçlandırılmasında ve sonuçlarının değerlendirilmesinde kısaca her aşamasında bana her türlü destek ve yardımlarını esirgemeyen, sabır ve anlayış gösteren çok değerli danışmanım Sayın Dr. Öğr. Üyesi Umut ÇALIŞKAN'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmam sırasında gerçekleştirmiş olduğumuz balistik testlerin ve sonuçların değerlendirilmesi aşamasında tecrübesi ile yardımlarını esirgemeyen ve bilgilerini benimle paylaşan kıymetli hocam Doç. Dr. Murat AYDIN'a teşekkürü bir borç bilirim. Poliüre kaplı kompozit malzemelerin temininde ve poliüre kaplanması hususunda desteklerini esirgemeyen Ata TEOMAN Bey'e teşekkürlerimi sunarım.

Hayatım boyunca atmış olduğum her adımda maddi ve manevi yanımda olan beni bugünlere getiren canım aileme, özellikle tez yazım aşamalarım da manevi destek sağlayan kardeşim Ahmet Mustafa MAHİR'e, son olarak tezimin her aşamasında göstermiş olduğu sevgisi ve hoşgörüsü ile her zaman yanımda olan sevgili eşim Aykut YARDIM'a şükranlarımı sunarım.

Cemile Şeyda YARDIM

Mayıs 2023, KAYSERİ

POLİÜRE KAPLI KOMPOZİT PLAKALARIN BALİSTİK PERFORMANSLARININ ARAŞTIRILMASI

Cemile Şeyda YARDIM

Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
Yüksek Lisans Tezi, Mayıs 2023
Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Umut ÇALIŞKAN

ÖZET

Savunma sanayi alanında zırh sistemlerindeki çalışmalar temelde iki özelliği kapsamaktadır. Bunlar kullanıldığı aracın üzerinde (araç zırhı) yada kullanıcı personelde (kişisel koruyucu zırh) fiziksel hareket kabiliyetini kısıtlamayacak ölçüde hafif olması ve diğer özellik ise hafif olmasıyla birlikte aynı zamanda darbelere ve patlamalara karşı yüksek balistik direnç göstermesidir. Bu kapsamda tehdit türüne ve şiddetine göre zırh malzemesi üretiminde seramikler, polimerler ve kompozit malzemeler çeşitlendirilerek kullanılmaktadır. Elastomerik polimer sınıfına dahil olan Poliüre malzemesinin yüksek uzama ve çekme dayanımı sayesinde malzemenin gerilimi ve kırılmaya karşı şok dalgalarını absorbe etmesini sağlamaktadır. Bu amaçla kullanılan poliüre balistik alanında zırhlarda kullanımı malzemede oluşan zaiyatı ve deformasyonu en aza indirgediği çeşitli araştırmalar ve deneyler ile doğrulanmıştır. Bu çalışmada sıcak pres yöntemi ile üretilmiş aramid kompozit levhaların balistik davranışına poliüre kaplamasının etkisi araştırılmıştır. Balistik testler, gazlı silah sistemi kullanılarak ve 0.3 kalibre parçacık benzetimli mermiler ile gerçekleştirilmiştir. Balistik dayanımlı sistemler için üretilmiş poliüre malzemesinin çeşitli amaçlar ile kullanılan kompozit zırh sistemlerinin balistik performansını arttırması amaçlanmıştır. Bu kapsamda farklı mermi hızları altında ve farklı kalınlıklardaki kompozit levhaların balistik performansı araştırılmıştır. Testler sonrası deney numunelerinin X-Ray CT görüntüleri alınarak poliüre kaplamasının etkisi ortaya konmuştur.

Anahtar Kelimeler: Balistik, Zırh, Polimer, Poliüre, Kompozit malzeme

INVESTIGATION OF BALISTIC PERFORMANCE OF POLYUREA COATED COMPOSITE PLATES

Cemile Şeyda YARDIM

Erciyes University, Graduate School of Natural and Applied Sciences
Master Thesis, May 2023
Supervisor: Dr.Öğr.Üyesi Umut ÇALIŞKAN

ABSTRACT

Studies on armor systems in the field of defense industry basically cover two features. These are light enough to not restrict the physical mobility of the tanks or user personnel (personal protective armor), and the other feature is that it is light and at the same time shows high ballistic resistance against impacts and explosions. In this context, ceramics, polymers and composite materials are diversified and used in the production of armor materials according to the type and severity of the threat. Thanks to the high elongation and tensile strength of the Polyurea material, which is included in the elastomeric polymer class, it allows the material to absorb stress and shock waves against breakage. It has been verified by various researches and experiments that the use of polyurea, which is used for this purpose, in ballistics, in armors, minimizes the loss and deformation of the material. In this study, the effect of polyurea coating on the ballistic behavior of aramid composite sheets produced by the hot press method was investigated. Ballistic tests were carried out using a gaseous weapon system and with 0.3 caliber particle simulated projectiles. The polyurea material produced for ballistic resistant systems is intended to increase the ballistic performance of composite armor systems used for various purposes. In this context, the ballistic performance of composite plates with different bullet velocities and different thicknesses was investigated. After the tests, X-Ray CT images of the test samples were taken and the effect of the polyurea coating was revealed.

Keywords: Ballistic, Armor, Polymer, Polyurea, Composite material

İÇİNDEKİLER

POLİÜRE KAPLI KOMPOZİT PLAKALARIN BALİSTİK PERFORMANSLARININ ARAŞTIRILMASI

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK ii
YÖNERGEYE UYGUNLUK iii
KABUL VE ONAY iv
TEŞEKKÜR v
ÖZET vi
ABSTRACT vii
İÇİNDEKİLER viii
KISALTMALAR xi
TABLOLAR LİSTESİ xii
ŞEKİLLER LİSTESİ xiii
GİRİŞ 1

1. BÖLÜM

GENEL BİLGİLER ve LİTERATÜR ÇALIŞMASI

1.1. Kompozit Malzemelerin Tarihsel Gelişimi 4
1.2. Kompozit Malzemeler 5
1.3. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması 7
1.3.1. Matris Malzemeye Göre Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması 7
1.3.1.1.Metal Matrisli Kompozitler 7
1.3.1.2. Seramik Matrisli Kompozitler 8
1.3.1.3. Polimer Matrisli Kompozit Malzemeler 9
1.3.2. Takviye Ediciye Göre Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması 10
1.3.2.1. Elyaf (Fiber) Takviyeli Kompozitler 10

1.3.2.2. Parçaçık Takviyeli Kompozitler **11**

1.3.2.3. Tabakalı Kompozitler **12**

1.3.2.4. Karma Kompozitler **12**

1.4. Kompozit Malzemelerin Avantaj ve Dezavantajları **13**

1.5. Polimer Malzemeler **13**

1.6. Poliüre **16**

1.7. Poliüre Kaplama **18**

1.8. Poliüre Kaplamanın Kullanım Alanları **19**

1.9. Poliüre Avantajları ve Dezavantajları **20**

1.10. Balistik **21**

1.10.1. İç Balistik **21**

1.10.2. Dış Balistik **22**

1.10.3. Terminal Balistik **22**

1.11. Balistik Darbe Mekaniği **23**

1.12 Penetrasyon Mekaniği **25**

1.13 Literatür Araştırması **26**

2. BÖLÜM

YÖNTEM VE MATERYAL

2.1. Materyal **36**

2.1.1. Poliüre kaplama **39**

2.2. Yöntem **43**

3. BÖLÜM

BULGULAR

3.1. 1. Tip Kaplamasız Kompozit Plakaların Balistik Test Sonuçları . **48**

3.2. 1. Tip Poliüre Kaplamalı Kompozit Plakaların Balistik Test Sonuçları **54**

3.3. 2. Tip Kaplamasız Kompozit Plakaların Balistik Test Sonuçları . **56**

3.4. 2. Tip Poliüre Kaplı Kompozit Plakaların Balistik Test Sonuçları 61

4. BÖLÜM

TARTIŞMA-SONUÇ ve ÖNERİLER

4.1. Sonuç ve Öneriler 65

KAYNAKÇA 67

ÖZGEÇMİŞ 73

KISALTMALAR

Al: Alüminyum.

PU: Poliüre.

TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 1. 1. Poliürenin Fiziksel Özellikleri 17
Tablo 1. 2. Poliürenin Kimyasal Özellikleri 18
Tablo 1.3. Merminin Namludan Çıktığı Andaki Sahip Olduğu Enerjinin Yaklaşık Dağılımı 22
Tablo 2.1. Numune özellikleri 39
Tablo 2.2. Tez çalışmasında kullanılan poliürenin mekanik özellikleri 40

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil G. 1 General Dynamics Şirketine Ait F-111 Hava Aracı 1
Şekil G. 2. Poliürenin Kimyasal Yapısı [3] 3
Şekil 1. 1. Kompozitlerin Genel Yapısı [8] 6
Şekil 1. 2. Metal Matrisli Kompozitlerin Sınıflandırılması[11] 8
Şekil 1. 3. Kompozit Malzemelerin Takviye Elemanına Göre Sınıflandırılması 10
Şekil 1. 4. Farklı tipte fiber kompozitler (a.Tek yönlü pekiştirilmiş sürekli fiber kompozit, b. Örgü formunda fiberlerle pekiştirilmiş kompozitler, c. Rastgele yönlenmiş süreksiz fiber kompozit, d)Yönlendirilmiş süreksiz fiber kompozit. [6] 11
Şekil 1. 5. Tabakalı kompozit malzemelerin ayrık görünümü[15] 12
Şekil 1. 6. Polimerizasyon [16] 14
Şekil 1. 7. Polerimer Moleküllerindeki Yapısal Farklılıklar [17] 14
Şekil 1. 8. Poliüre Sentez Reaksiyonu [18] 16
Şekil 1. 9. Darbeden dolayı oluşan ayrılmalar ve matris hasarı 24
Şekil 1. 10. Kinetik Enerji Penetrasyonu Süreci 25
Şekil 1. 11. Hedef olarak Levha Kullanımı Sonrası Levhalarda Oluşan En yaygın Deformasyon Çeşitleri 26
Şekil 2. 1. Polimer mikro yapısı 41
Şekil 2. 2. Poliüre yükleme durumu 41
Şekil 2. 3. Poliüre dalga yayılımı 42
Şekil 2. 4. Aramid ve poliüre kaplı Aramid kompozit levha 43
Şekil 2. 5. Balistik test sistemi (gaz silahı) 44
Şekil 2. 6. Gaz silahı sisteminde kullanılan sabot ve mermi. 45
Şekil 2. 7 (a) Hız ölçüm sistemi, (b) Bilgisayar kontrollü ateşleme ve basınçlandırma mekanizması 46
Şekil 2. 8. Numune bağlama aparatı 46
Şekil 2. 9. Balistik testlerde kullanılan yüksek hızlı kamera ve mermi çıkış hızı ölçümü 47
Şekil 3. 1. 24 katmanlı ve poliüre kaplama olmayan aramid kompozit plakaların yüksek hızlı kamera ile balistik test sırasında alınan görüntüleri (v: mermi hızı) 49

Şekil 3. 2. 24 katmanlı ve poliüre kaplama olmayan kompozit levhaların 548, 652 ve 662 m/s mermi hızları altındaki deformasyon görüntüleri.....50
Şekil 3. 3. 24 katmanlı ve poliüre kaplama olmayan kompozit levhanın 652 m/s mermi hızı altındaki kesit görüntüleri 51
Şekil 3. 4. 24 katmanlı ve poliüre kaplı aramid kompozit plakaların yüksek hızlı kamera ile balistik test sırasında alınan görüntüleri (v: mermi hızı) 52
Şekil 3. 5. 24 katmanlı ve poliüre kaplı kompozit levhaların 645, 656 ve 675 m/s mermi hızları altındaki deformasyon görüntüleri.....53
Şekil 3. 6. 24 katmanlı ve poliüre kaplı kompozit levhanın 675 m/s mermi hızı altındaki kesit görüntüleri 54
Şekil 3. 7. 28 katmanlı ve poliüre kaplama olmayan aramid kompozit plakaların yüksek hızlı kamera ile balistik test sırasında alınan görüntüleri (v: mermi hızı).....55
Şekil 3. 8.24 katmanlı ve poliüre kaplama olmayan kompozit levhaların 686 ve 715 m/s mermi hızları altındaki deformasyon görüntüleri 56
Şekil 3. 9. 28 katmanlı ve poliüre kaplama olmayan kompozit levhanın 686 m/s mermi hızı altındaki kesit görüntüleri 57
Şekil 3. 10. 28 katmanlı ve poliüre kaplama olmayan kompozit levhanın 715 m/s mermi hızı altındaki kesit görüntüleri 58
Şekil 3. 11. 28 katmanlı ve poliüre kaplı aramid kompozit plakaların yüksek hızlı kamera ile balistik test sırasında alınan görüntüleri (v: mermi hızı).....59
Şekil 3. 12. 28 katmanlı ve poliüre kaplı kompozit levhaların 682, 708 ve 722 m/s mermi hızları altındaki deformasyon görüntüleri 60
Şekil 3. 13. 28 katmanlı ve poliüre kaplı kompozit levhanın 708 m/s mermi hızı altındaki kesit görüntüleri 61
Şekil 3. 14. 28 katmanlı ve poliüre kaplı kompozit levhanın 722 m/s mermi hızı altındaki kesit görüntüleri 62

GİRİŞ

Günümüz şartlarında gelişen tehdit unsurları karşısında insanoğlunun ihtiyaçları da günden güne değişim göstermektedir. Bu amaçla korunma içgüdüsü ile bu ihtiyaçları giderebilmek adına çeşitli çalışmalar yapılmaktadır. Geçmişte yaşanan ve günümüzde de devam eden savaşlar sonucu araştırmalar bu alanda yoğunlaşılması gerektiğini göstermiştir. Özellikle silah ve füze sistemlerindeki gelişim savunma sanayi alanında yeni malzemelere ihtiyaç doğurmuştur. Duyulan ihtiyaçlar neticesinde malzeme biliminde de gelişmelerin hızlanmasını sağlamıştır. Bu alandaki çalışmalarda yüksek performansa ve avantajlara sahip olması nedeniyle kompozit malzemeler tercih edilmektedir. Uygulama alanlarının zamanla artmasına neden olan sahip olduğu en önemli kriterlerden biri olan mukavemetin yoğunluğa oranının yüksek çıkmasıdır. Bahse konu kompozit malzemelerin hava araçlarında (uçak, roket, helikopter vb.), kara araçlarında (tanklar, araçlar vb.) özellikle ikisine birden sahip olan askeri alanlarda kullanımı çok fazla sayıda yaygınlaşmıştır. Çağımızda çoğunlukla uçak endüstrisine yönelik kompozit malzeme kullanımı % 30 oranlarında kendini göstermektedir. Örnek olarak aşağıdaki şekilde kompozit malzemelerin kullanımında adını duyuran General Dynamics firması, bor-epoksi ikilisi kullanarak F-111'lerin gövdesini üretmişlerdir [1].



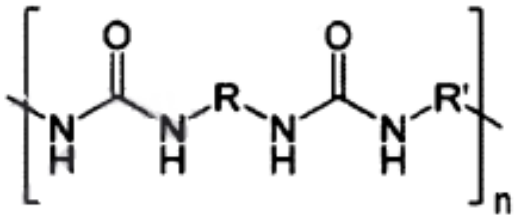
Şekil G. 1 General Dynamics Şirketine Ait F-111 Hava Aracı

Kompozit malzemelerin, hemen hemen her yapıda ve imalatta kullanılan alüminyumun yerine kullanılması ile %20-50, çelik malzemesi ile kıyaslandığında ise %60-80 arası ağırlıktan kazanım mümkün olmaktadır. Bu ağırlık kazanımları özellikle büyük bir sorun haline gelen enerji tüketimi konusunda fazla yakıt kullanımı başta olmak üzere savunma sanayi araştırmalarında en önemli unsurların başında gelen hareket kabiliyeti kısıtlamaların önüne geçilmesinde önemli katkılar sağlamaktadır [2]. Kompozit malzemelerin genellikle sergilemiş olduğu temel özellikler:

- İnsan yapımı ile üretilmesi,
- Birbirinden farklı kimyasal bileşenleri olan en az iki farklı malzeme ile oluşması,
- Tek başlarına sahip olmadığı özelliklerin, Bileşenlerin bir araya gelmesiyle birçok farklı özelliğe sahip olabilmeleridir.

Fakat kompozit malzemelerde tıpkı diğer malzemeler gibi birtakım ihtiyaçlara hali hazırda cevap verememektedir. Bu amaçla kullanılacak kompozit malzemelerin bazı takviyeler ile mekanik ve fiziksel özellerinin geliştirilerek performansının arttırılmasını mümkün kılmaktadır. Son yıllarda değişen ve gelişen teknolojik ihtiyaçlara yanıt verebilecek ürünlere yönelik çeşitli araştırmalar yapılmaktadır. Çeşitli mühendislik uygulamalarında metallerin yerine kullanım avantajı daha fazla olan polimer kompozitler de tercih edilmektedir. Hafif olmaları, mekanik dayanımlarının yüksek olması, insan bedeni ile uyumlu çalışmaları ve sertlik kriterinin ayarlanabilir olmaları sebebiyle polimer kompozitler yoğun olarak tercih edilmektedirler. Bu gibi ürünlerin başında son yıllarda popülerliği artan Poliüre gibi elastomerik polimerler, güçlendirme uygulamalarında ve ani yüklere maruz kalan sistemler için enerji emici malzemeler olarak talep görmektedir. Özellikle inşaat ve yapı sektörlerinde kullanımı yoğun olan poliüre, savunma sanayi alanında balistik alanda koruma seviyesinde yapılan çalışmalar ve bu çalışmaların sonucunda kullanıldığı malzemeye yüksek iyileştirmeler sağlaması sebebiyle son dönemlerde sıkça tercih edilmektedir. Poliürenin kimyasal yapısı Şekil G.2.'de gösterilmiştir. Poliüre kaplamaların kullanım alanına göre uygulandığı yapı ve sistemlerde balistik darbe direncini iyileştirerek hayatta kalma kabiliyetini ve balistik performansı önemli ölçüde artırdığı çeşitli çalışmalarda raporlanmıştır. Savunma sanayi alanında tehdit unsurlarının türü, çarpma sonrası yaratacağı tahribatın/deformasyonların

bilinmesi vb. hususlar göz önüne alındığında çeşitli zırh sistemleri tasarımında kullanılabilecek Poliüre kaplı kompozit malzemelerin malzemeler tasarımı, üretimi ve kullanım şeklinin bilinmesi hayatta kalabilmek ve korunabilmek için hayati önem taşımaktadır.



Şekil G. 2. Poliürenin Kimyasal Yapısı [3]

1. BÖLÜM

GENEL BİLGİLER ve LİTERATÜR ÇALIŞMASI

1.1. Kompozit Malzemelerin Tarihsel Gelişimi

Tarihsel dönemlerden günümüze kadar olan süreçte çok yaygın kullanım alanı olan kompozit malzemelerin geçmişi eski zamanlara dayanmaktadır. Özellikle yeni malzemelere duyulan ihtiyaçlar genellikle savaşlar sebebiyle ortaya çıkmıştır. Hayatta kalma ve kendilerine en az hasara uğratması istenen korunma ihtiyaçları yeni malzemelerin üretimine büyük bir amaç olmuştur. Kompozit malzemelerin tarihte ilk kullanım yeri antik çağlara uzanmaktadır. İnsanoğlu kırılgan ve hassas olan çeşitli malzemelere birbirinden farklı organik yapıda olan hayvansal ve bitkisel lif olarak adlandırdığımız yapılar ekleyerek, malzemenin dezavantajı olan hassas yapısını daha dayanıklı hale getirmiştir. Bu konuda bilinen en iyi örnek ise barınma sağlamlığı artırmak için kullandıkları kerpiç malzemesidir. Kompozitlerin bilimsel olarak incelenmesi ve bu malzemeler ile yeni malzemeler üretebilme durumunun başlangıcının sağlanması ise OwenCornıng adlı şirket tarafından gerçekleştirilmiştir. 1930'da bu şirkette çalışan bir mühendisin cam elyafı (fiberglass) ile yeni bir dönem başlamış, kompozitlerin bilimsel ve teknik açıdan incelenmesine sebep olmuştur. Bu malzemelerin ilk satışı ise Amerika Birleşik Devletlerinde 1937 yılında yapılmıştır. Sentetik plastikler ise 1930'lu yıllarda çeşitli araştırmalar sayesinde iyileştirilerek piyasada olan diğer malzemeler ile yarışabilecek seviyede kullanımı artmıştır. Fakat dayanıklılık ve sertliklerinin düşük olması plastiklerin mekaniksel özelliklerinin iyileştirilmesi gerekliliğine yönelik ihtiyacı ortaya çıkartmıştır. Bu bağlamda aynı dönemlerde keşfedilen cam fiberin plastiklerle test edilmesi için çalışmalar başlamıştır. 1936 yılında ise patenti alınmış doymamış polyester matrisler kullanılmaya başlanmıştır. 1938 'de epoksinin keşfedilmesi ile yüksek verim ve performans gösteren matrislerin kullanımına geçilmiştir. Özellikle II.Dünya Savaşının başlaması ile daha

fazla uçak, tank, tekne vb. araçların imal edilmesi kompozit malzemelerin gelişimini ve kullanım alanını artırmıştır. Yine aynı dönemde hücre yapılı çekirdekleri olan sandiviç yapılar başta olmak üzere ateşe ve yanmaya dayanıklı çeşitli kompozitler geliştirilmiştir. 1948 yılında cam fiber destekli teknelerde olduğu gibi bazı savaş odaklı uygulamalar sayesinde kompozitler ticari uygulamalara dönüştürülmeye başlanmıştır. Bunlara ek olarak 1947 yılında gövdesi tamamen kompozit malzemeden yapılan otomobil tasarlanarak üretimi yapılmış ve testleri icra edilmiştir. Yapılan bu çalışma, 1953 yılında keşif edilecek matris malzemesinin, önceden şekillendirilen camfiberlere emdirilme yöntemi ile metal kalıp kullanılarak kalıplanması sonucu üretimi sağlanacak Chevrolet Corvette'in geliştirilmesinde en başarılı prototip çalışma olarak literatürde yer almıştır. Deneysel olarak yaptığı çalışma ile karbon lifi patenti 1961 yılında A.Shindo tarafından alınsa da ticari alanda ilk karbon fiber üretimini İngilizler gerçekleştirmiştir. Bu yeni üretilen karbon fiber ile çok yüksek mukavemetli ve aynı zamanda çok hafif ağırlıkta üretilecek malzemeler aynı dönemde özellikle uzay sektöründe yoğunlukla kullanılmaya başlanmıştır. 1965 yılında bor fiberler, 1971 yılında ise dönemin en önemli keşiflerinden sayılan Dupont Firmasının sektöre kattığı ticari adı Kevlar olan "aramid fiberler" bulundukları dönemde ihtiyaçlara umut vadeden önemli malzemeler olmuştur. Bu malzemenin keşfedilmesi ile birlikte günlük yaşamda birçok sektörde hızlı bir şekilde ihtiyaçları karşılayarak kompozit malzeme kullanımı artarak gelişmiştir. 1960 lı yıllara kadar genellikle askeri alanda kullanımı gerçekleştirilen kompozit malzemeler(yüksek maliyetten kaynaklı), düzenli araştırmalar ve geliştirmeler sayesinde daha sağlam fakat ağır olmayan malzemelerin bu özellikleri sayesinde yoğun olarak kullanıldığı başta otomotiv ve havacılık sektörü olmak üzere birbirinden farklı sektörleri kompozit malzemelerle tanıştırmıştır. Geçmişten günümüze kadar gelişim gösteren teknoloji, rekabet ortamı ve ucuzlayan hammaddeyle birlikte kompozit malzemeler hakkında elde edilen teknik bilgiler sayesinde kompozit malzeme kullanımı devamlı olarak artmaktadır [4].

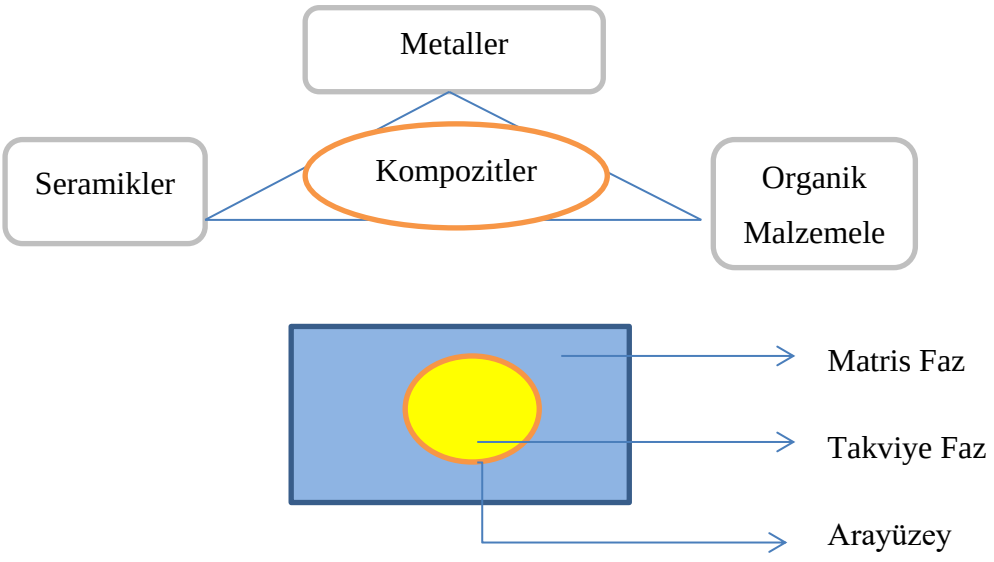
1.2. Kompozit Malzemeler

Kompozit malzemeler; en az iki ya da daha fazla malzemenin avantajlı olan özelliklerini birleştirme sonucu tek malzemede bir araya gelmesiyle ya da mevcut malzemelerde

olmayan farklı bir üstün özellik ortaya çıkarmak maksadı ile oluşturulan insan yapımı yapay malzemelerdir[5].

İki ayrı malzemenin birbirini içinde kontrollü şekilde karışmaları ile optimum özelliklere sahip kompozit malzemeler elde edilmektedir. Bu malzemeler sayesinde insanlar ihtiyaç duydukları farklı özellik ve yapıdaki malzemeleri üretmişlerdir. Kompozit malzeme genel yapısında hacimsel olarak çoğunluğu oluşturan bir matris ana fazı ve ana faz içinde olan takviye edici fazdan oluşmaktadır. Matris ve takviye fazları birbirleri içinde çözünmeyen inert yapılardır. Burada kompozit malzemenin yük taşıma ve dayanımını (mukavemetini) sağlayan faz takviye edici malzemedir. Diğer yandan matris malzemesinin iki ana amacı vardır; birincisi kompozit malzemede plastik deformasyona geçiş sürecinde meydana gelebilecek çatlaklar ve süreksizliklerin ilerlemesini önleyerek malzemenin kopma süresini uzatmaktadır. İkinci amacı ise yük altında olan fiber malzemelerin dağılmadan bir arada kalabilmeleri ve bu anılan yükü homojen olarak liflere paylaştırmaktır. Sonuç olarak plastik deformasyon olayı gerçekleşen fiber malzemelerde oluşabilecek çatlak ilerlemesinin engellenmesini mümkün kılınmaktadır [6].

Kompozit malzemeler mikro ölçekte heterojen yapıya sahipken öte yandan makro ölçekte homojen özellikler sergilerler.



Şekil 1. 1. Kompozitlerin Genel Yapısı [8]

Bu kriterlere istinaden sonuç olarak matris yapı elemanı uygulanmış bir kuvveti ara yüzey sayesinde takviye edici faza dağıtır. Bunun sayesinde deformasyonu önlemesi takviye fazını istenilen şekilde tutması sayesinde gerçekleşmektedir. Matris rijitliğinin

artması dolayısıyla dayanımın artması ve malzemeye etki eden yükün taşınabilmesinin temel sebebi takviye malzemesi kullanılması ile gerçekleştirilmektedir. Takviye elemanlarının en önemli kullanım amacı olan yükü taşıyabilmeleri, kullanılan matris malzemenin mekanik özelliklerine göre değişiklik göstermektedir. Matrisin mekanik özelliklerinin yüksek olması takviye elemanının yükü taşıyabilmesinde oldukça önemli bir husus olarak kendini göstermektedir. Bu kapsamda takviye malzemesi olarak çoğunlukla cam, seramik, plastik ve metaller tercih edilmektedir [8].

Kompozit malzemelerin genel olarak üretim amaçları aşağıda belirtmiş olan özellikleri ya da birkaçını iyileştirmek ve geliştirmektir. [9]. Bunlar;

- Mukavemet,
- Yüksek korozyon dayanımı,
- Yüksek termal dayanım,
- İyi elektrik iletkenliği,
- Rijitlik ve yorulma dayanımı,
- Akustik iletkenlik,
- Hafiflik,
- Ağırlık,
- Estetiksel yüzey görünümü,
- Maliyet.

1.3. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

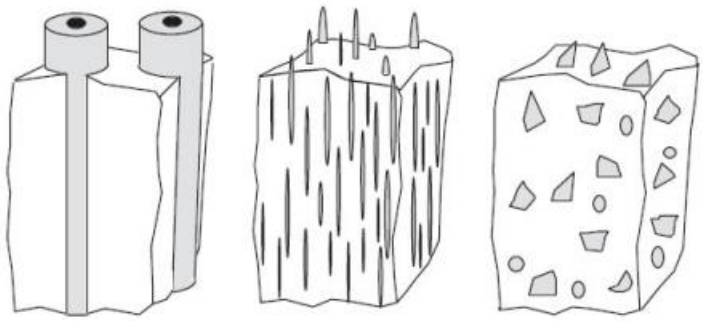
Kompozit malzemelerin sınıflandırılması, yapısında bulunan matris ve takviye malzemesine göre yapılmıştır.

1.3.1. Matris Malzemeye Göre Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Matris malzemeye göre kompozit malzemeler üç ana başlık altında sınıflandırmak mümkündür. Bunlar kullanım amacına ve üretim metoduna göre metal matrisli, seramik matrisli veya polimer matrisli malzemelerden oluşmaktadır.

1.3.1.1.Metal Matrisli Kompozitler

Metal Matrisli Kompozitler, metal bir matrise sahip olan kompozitlerdir. Metal matrisli kompozitlerde günümüzde tercih edilen matrisler Al, Mg ve Ti ‘dur. Karbon ve silisyum karbür ise tercih edilen fiberler olarak söylenmesi mümkündür[10]. Metallerin birçoğu yüksek sıcaklıkta bazı özellikleri sağlamalarına rağmen fiziksel olarak hassas yapıda davranış sergilerler. Öte yandan metal matrisli kompozitlere metalik fiberlerin eklenmesi sonucu iki fazında birbirleri ile dengeli çalışması sonucunda çok yüksek sıcaklıklarda dahi malzemelerin performansının arttığı tespit edilmiştir. Bu kompozitlerin elde edilme yöntemi sayesinde matrisin özelliklerinde daha az maliyet harcanarak daha fazla performans elde edilmesi mümkün olmaktadır. Metal matrisli kompozitlerde ikinci faz sürekli lif halinde düzenli ya da düzensiz dağılmış vaziyette de olabilmektedir ve Şekil 1.2.’de matriste bulunan takviye elemanının dağılma vaziyetine göre karşılaştırma esasına bağlı olarak tasniflenmiştir [6],[8].



Şekil 1. 2. Metal Matrisli Kompozitlerin Sınıflandırılması[11]

1.3.1.2. Seramik Matrisli Kompozitler

Metal ya da metal olmayan malzemelerin bir araya getirilmesi ile meydana gelen bu kompozit çeşidi, çok yüksek sıcaklıklara dayanıklı, rijit ve hafif olmaları sebebiyle tercih edilmektedir. Seramik matrisli kompozit malzemeler özellikle yüksek sıcaklıklarda kullanımı gereken ve bu sıcaklıklarda malzeme dayanımlarının deforme olmayacağı malzemelerde kullanılmaktadır. Bu malzemeler sert oldukları kadar aynı zamanda hassas ve kırılgan yapıdadır. Bahse konu özelliklerinden dolayı gevrek özellik sergilerler ve dolayısıyla olabildiğince düşük sünek yapıya sahip demek mümkündür. Bunlara ek olarak bir başka dezavantajı ise termal şoklara karşı direnç gösteremediklerinden dayanımları düşüktür. Bu sebepten ötürü çeşitli liflerle takviye edilerek seramik esaslı kompozitlerin bu eksikliklerin giderilmesi sağlanmaktadır. Öte

yandan seramik matrisli kompozitler yüksek sıcaklıklarda çalışma toleransına sahip olmakla birlikte elastiklik modülü oldukça yüksektir. Yüksek sıcaklıklarda çok yüksek dayanım göstererek bu çalışma aralığında rijit yapı sergilerler. Aynı zamanda elektriği iletmezler, yakıtkandırlar. [12]. Seramik matrisli kompozitler heterojen malzemeler olarak tanımlanır. Sürekli fiber takviyeli ve süreksiz takviyeli olarak iki başlıkta toplamak mümkündür. Bu malzemeler savunma sanayi alanından, otomotiv sektörü, havacılık sektörü ve tıp gibi çeşitli alanlarda kendine kullanım alanı bulan malzeme grubudur.

1.3.1.3. Polimer Matrisli Kompozit Malzemeler

Polimer matrisli kompozitler son yıllarda en yaygın kullanımı olan kompozit malzeme olmuştur. Polimerik kompozitler günlük hayatta kullanımının artmasının nedenleri korozyona karşı yüksek direnç sergilemeleri, kullanım ömürlerinin uzun olması, dayanıklı ve sağlam malzeme olmaları, darbe dayanımı, aynı zamanda hafif olması, kolay olarak şekillendirilebilir malzeme olmalarıdır. Bu kompozit malzemelerde genelikle tercih edilen fiberler, cam, aramid, bor, alümina ve karbon fiberlerdir. Polimer matrisli kompozitlerin sınıflandırılması, termoset matrisli kompozitler ve termoplastik matrisli kompozitler olmak üzere iki başlık altında toplanmıştır. [13]

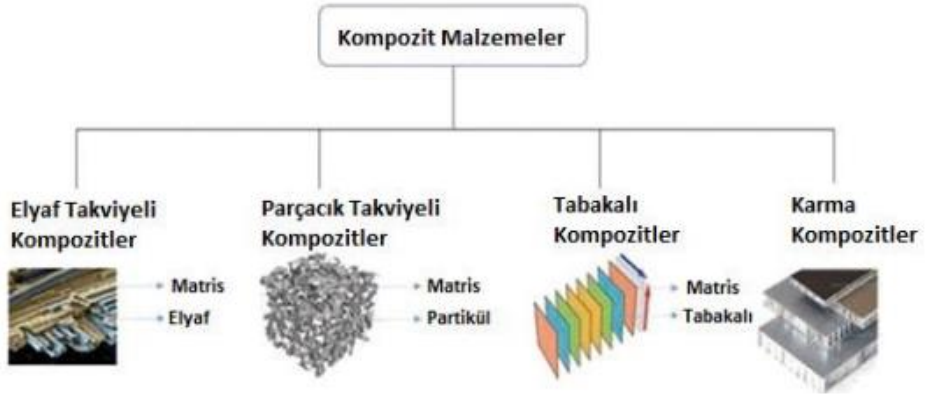
Termoset matrisler; Sıvı halde bulunarak lif takviyeli kompozitlerin üretiminde kullanılan termoset matrisler birtakım katı ilaveler ile katılaştırabilir. Bu matrisler yüksek olmayan viskoziteye sahiptirler ve (sıvıların akmaya karşı gösterdikleri direnç) bu matrislerde kullanılan reçinelerin özellikleri ölçme yönüne göre değişmez izotropik davranış gösterirler. Kullanım ömürleri uzundur. Yüksek ısıya maruz kaldıklarında deforme olmayıp, dayanımları yüksek olan malzemelerdir. Isıl direnci en yüksek olan plastik grubunda poliamidlerdir. Bu gruptaki malzemelerin yeniden işlenemez veya şekillendirilemezler. Bu alanda yoğun olarak tercih edilen termosetler, doymamış polyesterler, epoksiler , silikon reçiner, , poliüretanlardır.[14].

Termoplastik matrisler; Termoplastik matrisler termosetlere göre yeniden şekillenebilme yeteneğine sahip sünek yapıda malzemelerdir. Isı etkisi ile eritilir istendiği takdirde soğutma ile yeniden katılaştırılabilirler. Termoplastikler genellikle doğrusal veya az dallanmış yapılardan oluşan polimerlerdir. Fakat kompozit malzemelerde genellikle matris olarak tercih edilmemelerinin nedeni yüksek maliyet ve

üretim zorluğudur. Termoplastikler, atomların kararlı bir kristal yapıya sahip olmadığı katı veya yarı kristalin yapıda davranış göstermektedirler. Kararlı bir kristal yapıya sahip olmadığı katı halde (amorf) moleküller rastgele düzenlenmiş haldedir. Moleküllerin sıkı paket halinde düzenli yapıya sahip olduğu hal ise kristalin bölge olarak adlandırılır. Bu yapılarda sık tercih edilen termoplastikler naylon polipropilen ve polietilendir [7].

1.3.2. Takviye Ediciye Göre Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Takviye edici malzemeye göre kompozitlerin gruplandırılma görseli Şekil 1.3'de verilmiştir. [8]

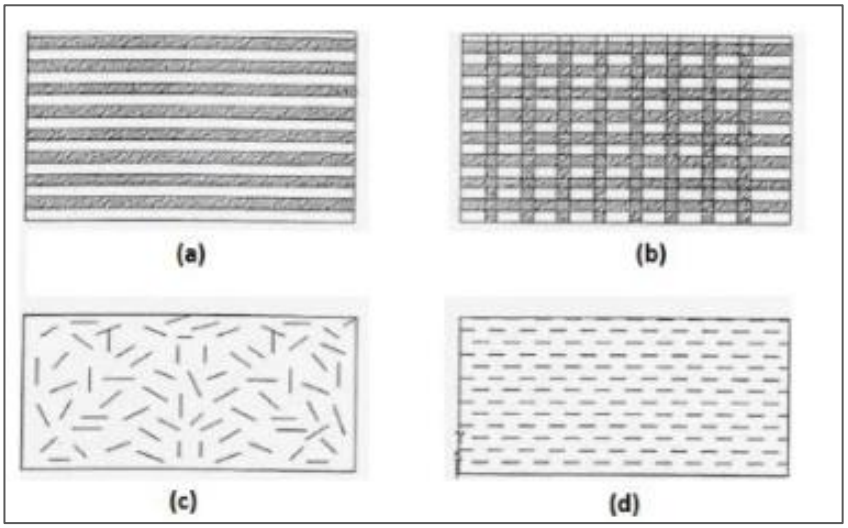


Şekil 1. 3. Kompozit Malzemelerin Takviye Elemanına Göre Sınıflandırılması

1.3.2.1. Elyaf (Fiber) Takviyeli Kompozitler

En yaygın olarak kullanılan kompozit malzeme türü elyaf takviyeli kompozitlerdir. Bu tip kompozitler, verimliliği yüksek olan liflerin eklenmesi ile üretimi sağlanmaktadır. Elyaf takviyeli kompozit malzemelerde ilk akla gelen takviye malzemesi camdır. Bu kompozitlerde reçineler ise termoplastik ya da termoset olarak kullanılabilirler. Polyester reçinesi kullanıldığı malzeme sektöründe üreticiler için ekonomik olması, pahalı olmamasından kaynaklı plastik reçineler arasından en fazla tercih edilen malzeme çeşididir. Bu kompozitler de kullanılan elyaflar ise sürekli elyaflar (kesintisiz uzama oranına sahip) ya da süreksiz elyaflar (uzun elyafların kesim faaliyeti sonucu elde edilen) olarak sınıflandırılabilir. Diğer bir önemli konu olan dayanımı artıran takviye lifleri ise uzun lif, kısa lif gibi çeşitli formlarda olabilmektedir. Kullanım alanına göre elyaf takviyeli kompozitlerin performasına etki eden en kritik faktörler, fiberlerin

yönelimi, uzunluk ve şekil geometrisi, kullanılan matrisin mekaniksel başarımı olduğu gibi özetlenebilmesi mümkündür. Kısaca liflerin uzanış şekillerine göre kompozitlerin performansı şekillenmektedir[13]. Elyaf yapısında üretilen kompozitlerin mukavemetleri, kütle halindeki değerinden daha yüksek olmaktadır. Buradan da anlaşılacağı üzere endüstride elyaf takviyeli kompozit kullanılması durumunda malzeme özellikleri mevcut hale göre üst seviyeye taşınmaktadır.



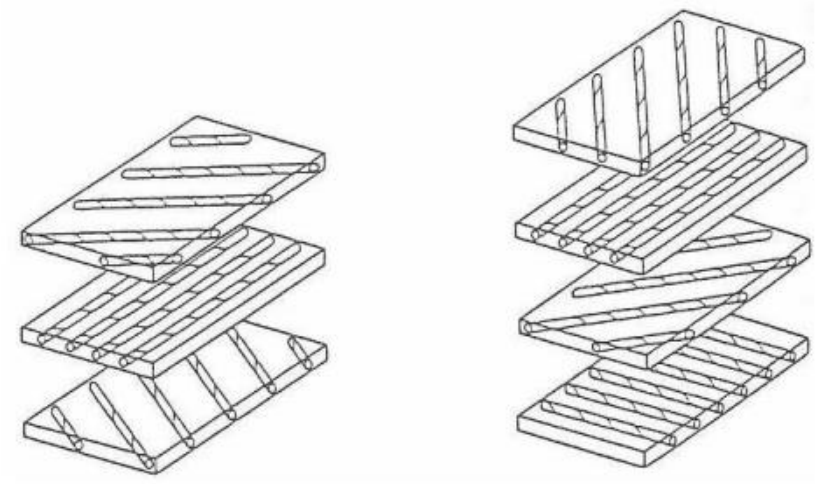
Şekil 1. 4. Farklı tipte fiber kompozitler (a.Tek yönlü pekiştirilmiş sürekli fiber kompozit, b. Örgü formunda fiberlerle pekiştirilmiş kompozitler, c. Rastgele yönlenmiş süreksiz fiber kompozit, d)Yönlendirilmiş süreksiz fiber kompozit. [6]

1.3.2.2. Parçaçık Takviyeli Kompozitler

Bu kompozit çeşitin de kullanılan parçacıklar büyük oranda malzeme özelliklerini artırmak için kullanılır. En çok bilinen avantajları sertlik artırıcı etkisi ve aynı zamanda üretim maliyeti düşük olma sebepli tercih edilmektedir. Kullanıldığı takdirde malzemenin mukavemetini az da olsa iyileştirmektedir. Ancak genel kullanım amacı ekonomik ve az maliyetli olmasından kaynaklanmaktadır. Parçacık dolgulu malzemelerde de performansa etki eden birtakım unsurlar bulunmaktadır. Bu unsurlardan en önemli kriterler; parçacıkların boyutsal dağılımları, yüzeyde biriken enerjileri, boyutların hacimsel oranı, parçacık dağılımının gelişi güzel olarak değil homojen olarak ana malzemeye dağılmış vaziyette olması gibi hususlar ile kompozit malzemelerin performansına etki etmektedirler.

1.3.2.3. Tabakalı Kompozitler

Tabakalı kompozit yapı en eski ve en yaygın kullanım alanına sahip olan kompozit yapı tipidir. Farklı elyaf yönlenmelerine sahip tabakaların birleşimi ile yüksek mukavemet değerleri elde edilmektedir. Aynı zamanda ısı ve neme karşı dayanımı yüksektir. Mukavemetleri yüksek aynı zamanda metallere göre hafif olmaları gibi olumlu özelliklerinden dolayı tercih edilmektedir [6],[8]. Çok tabakalı kompozitler;vmaliyeti düşük, ağır olmayan, malzeme yüzeyinde aşınmalara karşı direnci yüksek, uzun kullanım ömrüne sahip, yüzey kalitesi ve görünümü pürüzsüz sayılabilecek derecede gelişmiş ve ısıl genleşmesi yüksek gibi avantajları bulunmaktadır. Olumlu ve olumsuz özelliklerine rağmen birbirinden farklı malzemeler ile tabakalı kompozit oluşumu sayesinde malzemelerin ihtiyaç doğrultusunda eksik olan mekanik ve fiziksel özellikleri iyileştirilmektedir. Havacılık sektöründe özellikle tabakalı kompozit kullanımı uçak yapılarının üretiminde yoğun olarak tercih edilmektedir.



Şekil 1. 5. Tabakalı kompozit malzemelerin ayrık görünümü[15]

1.3.2.4. Karma Kompozitler

Aynı kompozit yapıda iki ya da daha fazla takviye elemanı çeşidine sahip olan kompozitlerdir. Bu tip kompozitlere “hibrid (melez) kompozitler” denilmektedir. Tek bileşenden oluşmuş yeterince verimli olmayan özellikte malzemelere göre üstün özellikler sergilemektedirler. Anılan malzeme grubu endüstride yeni arayışlara cevap verebilecek kompozitlerin keşfini sağlamaya yarayan bir malzeme grubudur. Endüstride en yoğun olarak karşımıza çıkan ve tercih edilen karma kompozit cam ve karbon elyaf takviyeli kompozittir. Birbirinden farklı iki malzemenin eksik olan hususlarını ve

birbirine göre üstün özelliklerini bir araya getirebilecek karma kompozit olarak grafit-kevlar ikilisi örnek olarak gösterilebilir. Bahse konu iki elyaf ile imal edilen karma kompozitin, tokluğu grafit kompozitten iyi, daha ekonomik ve basma mukavemeti ise kevlar elyaflıdan yüksek olduğu doğrulanmıştır. [6],[8].

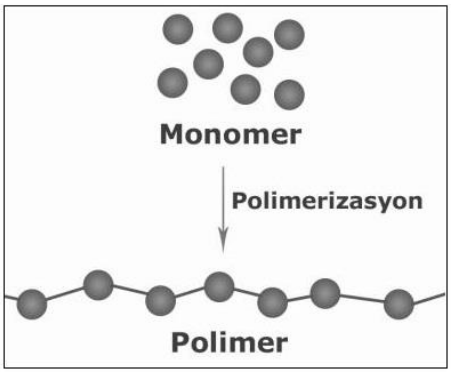
1.4. Kompozit Malzemelerin Avantaj ve Dezavantajları

Kompozit malzemelerin avantajları, yüksek dayanım ve rijitlik, mükemmel denebilecek derece yüksek aşınma direnci, antikorozif özelliği sayesinde korozyona karşı dayanıklı olması, termal iletkenliği iyi, yoğunluğu düşük,çok iyi ısı kapasitesi, çelik cinsindeki malzemelerde çok yönlü kullanımı ve rahat bir şekilde kolay kalıplama kabiliyeti, iyi titreşim sönümleme kabiliyeti, çevresel etkenlere karşı termoset özellikleri sayesinde fonksiyonlarında herhangi bir kayıp söz konusu olmadan koruyabilmesi kısaca boyutsal stabilite özelliği gibi birçok avantajı bulunmaktadır.

Kompozit malzemelerin dezavantajları ise günümüz şartlarında devamlı oalrak gelişmekte olan bir malzeme alanıdır. Bu husus kompozit malzemeleri halen gelişmekte olan teknoloji sektörü olarak yansıtmaktadır. Araştırmalar ve bilimsel deneysel sonucunda imalat maliyeti yüksek olmasından kaynaklı üretimde kullanılmasında kısıtlamaya gidilmesine sebebiyet vermektedir. Kompozit malzemelerin geri dönüşüm faaliyetlerinin olmaması, sünekliğin arzu edilen düzeyde iyi olmaması ve üretimi gerçekleştirecek olan işgücünde yetkin personel eksikliği gibi hususlar dezavantajları olarak sıralanabilir[6].

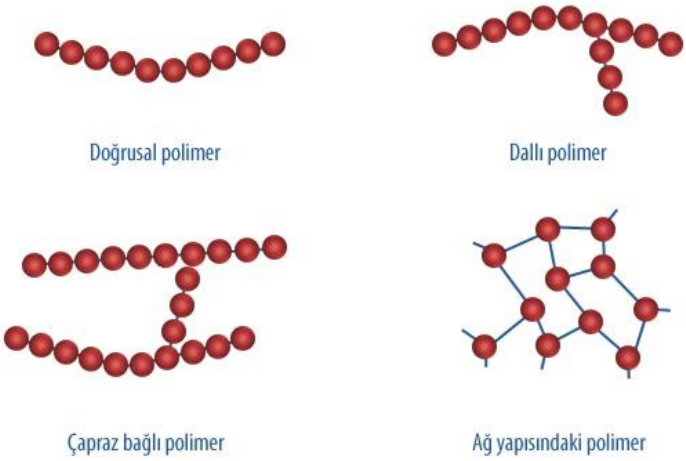
1.5. Polimer Malzemeler

Küçük moleküllerin (monomerlerin) kimyasal bağlar yardımı ile bağlanarak iki yada üç boyutta büyük moleküller (polimer) meydana getirmesine polimerizasyon denilmektedir. Tek bir polimer zincirinde milyonlarca monomer bulunur ve bunun sonucunda ortaya çıkan polimerizasyon işlemi Şekil 1.6’de gösterilmiştir.



Şekil 1. 6. Polimerizasyon [16]

Hayatımızı ve gelişen teknoloji şartları nedeniyle hayatımızı kolaylaştıran birçok ürün polimerlerden oluşmaktadır. Bu malzemeler aslında yıllardır doğada hazır olarak bulunmaktaydı fakat son yıllarda açığa çıkan ihtiyaçları karşılamak amacı ile çeşitli yöntemlerle insan yapımı olarak da üretimi mümkündür.



Şekil 1. 7. Polerimer Moleküllerindeki Yapısal Farklılıklar [17]

Askeri sanayi sektörü başta olmak üzere sivil sektörde çeşitli kulvarlardaki ihtiyaçlara cevap verebilen polimerler çağımızda kullanım alanı genişleyen önemli malzemelerden biri olarak adını duyurmuştur. Günümüzde polimer malzemelerin çoğunlukla tercih edildiği kullanım alanlarının başında gelen savunma sanayi sektörüdür. Özellikle son yıllarda havacılık sektöründe, askeri araçlarda zırh malzemesi olarak daha hafif ve sağlam olan polimer kompozitlerin kullanımı devamlı olarak gelişmekte olan

nanoteknoloji imkanları ile önemli ölçüde tercih edilmektedir. Savunma sanayi sektöründe balistik koruma maksadı ile tercih edilen polimerler, polimer esaslı bağlayıcı matris malzemesine polyester eklenmesi ile veya reçinesiz kullanımlar tercih edilmektedir. Bu yapıdaki malzemeler düşük ağırlıkta yani hafif olmaları nedeni ile büyük avantaj sağladığı vücut zırhı yapımında tercih edilmektedirler. Askeri yeleklerde özellikle kullanılan kumaş gibi malzemelerin üretiminde ise balistik koruyuculuk seviyesi içerisine eklenen liflerin mekanik özelliklerine göre değişmektedir. Bu mekanik özelliklerden kasıt elastisite modülü ve kopma uzamaları gibi kriterlerdir. Anılan hedef doğrultusunda üretimi yapılmaya başlanan ilk liflerde yüksek ateş unsuru içermeyen unsurlara karşı korunmada birden fazla katlı yapılar şeklinde büyük etki göstermiştir. Katlı materyallerin üretimi ile kullanıcıda fazladan ağırlık yüklenmesi ile hareket kabiliyeti sınırlandırılmıştır. Bu olumsuz durum neticesinde yapılan koruyucu malzemelerde hafif olması ve aynı zamanda dayanım ve rijitliğin artması amaçlanmıştır. Bu kapsamda yapılan araştırmalar ve deneysel neticesinde yüksek performans lı lif imal edilmeye başlanmıştır. Savunma sanayi alanın da balistik kumaş kategorisinde üretim için tercih edilen yüksek molekül ağırlığına sahip polietilen, mukavetemeti yüksek olan aramid gibi lifler son yıllarda sıkça tercih edilmektedir [18].

Kullanıldıkları alanlarda darbeler sonucu malzemede oluşan hasarları engellemeye yönelik çeşitli çalışmalar raporlanmıştır. Buna yönelik oluşan hasarı azaltmak için yenilikçi ve daha az maliyetli elastomerik polimerlerin (poliüre ve poliüretan gibi) kullanımının uygulanabilirliğine yönelik araştırmalar sonucunda birtakım özellikler tespit edilmiştir. Bunlar; yüksek uzama kapasiteleri, kolay uygulanabilirliği, yüksek oranda enerji emme/soğurma kabiliyeti, yüksek direnç göstermeleri, yapısal malzemeler için koruyucu bir tabaka görevi görerek dayanıklılığı artırmasıdır[20]. Nüfuz etme, darbe ve patlama deformasyonlarına karşı polimer kaplı malzemelerin kullanımı üzerine yapılan çalışmalar ile elde edilen bulgulara bakıldığında, polimer kaplamalar kullanılarak yapılan metal binalarda bu yapıların patlama ve balistik direncinin iyileştirildiğini kanıtlamıştır [21].

Polimerler; termoplastik, termoset ve elastomerler olmak üzere üç temel sınıfta toplanmaktadır. Bu tez çalışmasının ana konusu bir elastomerik polimer sınıfına dahil olan Poliüre ise, günümüz şartlarında göz ardı edilemez özelliklere sahip olduğu

mekanik özellikleri nedeni ile mühendislik çalışmalarında her geçen güm oranda kullanımı artmaktadır.

1.6. Poliüre

Günümüzde kaplama sektörünün vazgeçilmez malzemelerden biri olan Poliürenin, yapılan araştırmalar neticesinde yaklaşık 80 yıllık bir geçmişe sahip olduğu bilinmektedir. Farklı polimer malzemelerininde erime sıcaklıkları tablosunun yayınlandığı Polimer Bilimi Dergisinde Poliürenin resmi kaynaklarda ilk olarak tanıtılması ise 1948'de başlamıştır. Son otuz yılı aşkın süredir ise deneysel çalışmalar poliürenin nasıl kaplanacağının üzerinde yoğunlaşmıştır. Poliüre kaplamasının farklı metodlar ve teknikler kullanılarak teknolojisinin gelişmesi ile kaplama yöntemi kolay uygulanabilen, dayanıklı ve az maliyetli olan malzeme arayışına çare olmuştur. İlk olarak ticari poliüre 1989 yılında Texaco Chemical Company tarafından piyasalara tanıtılması ile çatıların su yalıtımı sağlanması konusunda kullanılmıştır.

Bir poliüre malzemesi, izosiyanatın poliaminlerle reaksiyonuyla sentezlenmektedir [22]. Poliüre, çok güçlü primer bağlarına sahiptir. Bu sayede üç boyutlu ağ oluşturabilmektedir. Elastomer yapıya sahip çapraz bağlı polimer çeşitidir.[23].



Şekil 1. 8. Poliüre Sentez Reaksiyonu [18]

Poliüre viskoelastik yapısından dolayı oldukça sünek yapıya sahiptir. Kendi uzunluğunun neredeyse iki katına kadar uzayabilme yeteneği, düzensiz yapılar ve zincirler arası çapraz bağların düşük yoğunlukta olmasıdır. Bu kimyasal özellikleri sebebiyle yapılan çeşitli deneysel araştırmalarda, maruz kaldığı darbe dayanımı ve sönümleme özelliği sayesinde özellikle askeri alanda zırh imalatlarındaki başarısı kanıtlanarak, poliüre kullanımı gün geçtikçe artmaktadır[20].

Yüzeylere oldukça iyi bağlanma/yapışma özelliğine sahip Poliüre malzemesi yaklaşık olarak 5-15 saniye arasında katılaşmaktadır. Çok kısa zaman diliminde gerçekleşen bu kimyasal reaksiyon sayesinde ortamdaki yabancı maddelerden (nem, sıcaklık, toz, vb.) etkilenmemesi sağlamaktadır. Kısaca poliüre malzemesinin kolay uygulanabilir olması ve yüzeylere homojen olarak dağılması nedeniyle neredeyse her yüzeyde poliüre kaplama işlemi gerçekleştirilmektedir. Aynı zamanda kaplama yöntemi sadece sprey ile olmamakla birlikte fırça yardımı, püskürtme metodu ya da çubuk yöntemi kullanılarak gerçekleştirilebilmektedir[18], [22]. Özellikle sprey kaplama endüstrisinin gelişimi ile, yapısal bileşenlerin mekanik mukavemetini ve dayanıklılığını arttırmak, balistik korumayı güçlendirmek ve enerji absorplayıcı olarak çeşitli uygulamalarda ileri bir güçlendirme malzemesi olarak tercih edilmektedir [23].

Diğer polimer esaslı malzemelere göre poliürenin fiziksel mukavemet değerinin düşük olmasına rağmen yüksek uzama kapasitesinin varlığı, yüksek gerilmelere sahip itici yüklere karşı darbeyi sönümleme özelliği ile en dikkat çeken malzemelerden biri olmasından kaynaklıdır. Bu poliürenin yüksek korunma derecesi faktörü ile sergilediği olumlu grafik sayesinde balistik uygulamalarda oldukça önemli konuma sahip olduğunu kanıtlamaktadır[20]. Poliüre malzemesinin sahip olduğu fiziksel ve kimyasal özellikler aşağıdaki tablolarda verilmiştir[18].

Tablo 1. 1. Poliürenin Fiziksel Özellikleri

Özellik	Değer
% Uzama	425
Kopma Mukavemeti (MPa)	21
Çekme Mukavemeti (MPa)	31
Sertlik (Shrore A) 1	92-95

1 Shore sertlik değeri, plastik malzemelerin sertliğini ölçmek için kullanılır.

Tablo 1. 2. Poliürenin Kimyasal Özellikleri

Özellik	Değer
PH değeri	8-10 (20 C)
Katılaşma Sıcaklığı	<0 C
Kaynama Noktası	306 C
Tutuşma Sıcaklığı	<250 C
Buhar Basıncı	>10 mbar (20 C)
Yoğunluk	1,02 g/cm (20 C)

1.7. Poliüre Kaplama

Poliüre, izosiyanat ve poliamin reaksiyonundan meydana gelen elastomer çeşitidir. Bu iki bileşenin bire bir oranda birleştirilmesi yüksek sıcaklık basınç altında yapılmaktadır. [23,25]. Yüksek basınçlı ısıtma sistemi olan cihazlar kullanılarak poliüre kaplamaları gerçekleştirilmektedir. Cihazlarda bulunan hortumlarda aynı şekilde yüksek sıcaklık ve basınca dayanıklıdır. Hortumalrın ucunda bulunan tabancalar ise poliürenin ilgili malzemeye püskürtüldüğü yapılardır. Poliürenin kürleşmesi için hortumlarda da ısıtma sisteminin bulunması sayesinde reaksiyon hızlı bir şekilde gerçekleşmektedir. Poliüreyi oluşturan iki ana etmen bire bir oranda karıştırılarak yaklaşık 90°C civarında 120 bar basınçla tabancaya iletilmektedir[24]. Poliüre kaplamada kaplamanın kalitesini belirleyen önemli koşullar, püskürtülen malzemenin yüzey temizliği, püskürtme kalınlığı, püskürtme arayüz durumu vb. poliüre püskürtme şartlarıdır. Bu şartlar optimum düzeyde hassas ve doğru prosesler ile sağlandığı takdirde yüksek darbeli yükleme altında poliüre kaplı metal plakaların dayanım performansını önemli ölçüde iyileştirmektedir[26].

Poliürenin kaplama, kaplama kalınlığı arttıkça ve kaplama alanı kısmi kaplamaya kıyasla, tüm yüzeye homojen olarak uygulandığı takdirde poliüre destek katmanlarının enerji emme/absorbe etme özelliklerinden daha yüksek oranda faydalanılmaktadır.

Poliüe kaplanmış bir çelik levha, kaplanmamış çelik levhaya göre kinetik enerjiyi daha yüksek oranda sönümlediği/emdiği kanıtlanmıştır.

1.8. Poliüre Kaplamanın Kullanım Alanları

Poliüre kaplama dayanıklı sistematik yapısı ile yüksek yüzey kalitesi ile kalandığı alana genel fiziksel avantajlar kazandıran bir kaplama yöntemidir. Yüksek verimde fiziksel özellikleri ile yapıların inşasında kullanımı yaygınken son zamanlarda ise malzemelerin mekaniğine olan olumlu etkisi ile mühendislik sektöründe yoğun olarak araştırılmasına aynı zamanda poliürenin geliştirilmesine yönelik yürütülen birçok çalışma ve deneylerle desteklenmesine neden olmuştur. Poliüre kaplamanın yaygın olarak kullanıldığı alanlar aşağıda sıralanmıştır:

- Borular, yağmur suyu olukları ve su depolarında sızdırmazlık amaçlı, petrokimya
- Endüstriyel zeminlerde (Otopark, atölyeler vb.) zeminlerinin yangından korunması, ani frenlere ve yüksek hızda zemindeki kayganlığının giderilmesi/azaltılması amaçlı,
- Yer altı, üstü boru boru hattı kaplamasında, çizgi çizmede kullanılır
- Duvarlarda, çatılarda ve beton yapılarda çatlakların ve kusurların tadilatında,
- Otomotiv sektöründe kasaların (Kamyon kasası ve römorklar) kaplama işlemlerinde,
- Savunma sanayisindeki askeri araçlarda korozyona karşı dayanıklı sistemlerin geliştirilmesi, darbe ve balistik koruyucu panellerin oluşturulmasında,
- Yüksek darbelere ve hasarlara karşı mukavemeti yüksek, uzun ömürlü, hasar deformasyonuna karşı direnç seviyesi artırılmak istenen sistemlerin tasarımında,
- Su depoları, yangın suyu depoları, biyolojik atık su ve arıtma gibi her çeşit tankların kaplanmasında, bu tanklarda bulunan ağır kimyasallara karşı korozyon önleyici olarak tercih edilmektedir.

Poliüre malzemesi de diğer malzemeler gibi olumlu ve olumsuz kimi özelliklere sahiptir. Ancak olumsuz yönleri ile karşılaştırıldığında poliüre birçok olumlu özelliği sayesinde tercih edilmektedir. poliüre kaplama sisteminin avantajları ve dezavantajları aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır.

1.9. Poliüre Avantajları ve Dezavantajları

Avantajları;

- Kısa süren bir imalat prosesine sahiptir, zamanda ve maliyette tasarruf sağlamaktadır.
- Uygulandığı malzeme içindeki korozyonu ve aşınmayı önleyerek malzeme ömrünü önemli derecede artırmaktadır.
- Suya ve neme karşı dayanıklılığı yüksektir.
- Sentezi tamamlanan poliüre malzemesi sonrası atık olarak gaz salınımı veya zararlı bir yapı çevreye verilmemektir. Aksine atık ürün olarak sadece su oluşmaktadır.
- Çevre dostu malzemedir.
- UV radyasyonu gibi agresif atmosferik faktörlere karşı yüksek direnç
- Darbelere ve tahribatlara karşı göstermiş olduğu direnç oldukça yüksektir.
- Esnek ve dayanıklılığı yüksek yapıdadır.
- Yangına karşı direnci yüksek yanmayan bir malzemedir.
- Poliüre kullanılarak tamamen sızdırmaz kaplamalar yapılmaktadır.
- Endüstride neredeyse her yüzeye uygulanabilir yapıdadır.
- Reaksiyonlar sırasında oluşabilecek ani sıcaklık dalgalanmalarına göre göstermiş olduğu direnç oldukça yüksektir, deformasyona uğrama olasılığı düşüktür.

- *Dezavantajları;*

- Poliüre kaplaması uygulaması gereği kullanılan ekipmanlar ekonomik değildir.

- Uygulamaya başlanılmadan işlem için kullanılacak malzeme öncesinde hassas bir yüzey temizliği sağlanmalıdır. Yüzey ne kadar pürüzsüz olursa yapılan uygulama o kadar kaliteli olmaktadır.

- Uygulama esnasında devamlı olarak proses şartları kontrol edilerek uygun atmosferik şartlar sağlanmadan uygulamaya devam edilmemelidir.

- Yapılan poliüre kaplamasının performansı yüksek oranda personel eğitimiyle sağlanmaktadır [25].

1.10. Balistik

Balistik sözcüğünün kökeni Roma İmparatorluğundan gelerek Yunanca ballein (fırlatmak) sözcüğünden ortaya çıkmıştır. Atış yapılan merminin hedefe ulaşana kadar sergilediği hareketler inceleyen alandır. Barutun icat edilmesi ile balistik bilimi de literatüre girmiştir. İlk olarak 10.yy dan önce Çinliler tarafından kullanıldığı bilinmektedir[27]. Benjamin Robins 1742 yılında keşfettiği balistik sarkaç kullanımı ile namlu ağzı çıkış hızlarını belirlemiştir. Barut gazının basınç ölçümü ise 1792 yılında Count Rumfort tarafından çeşitli deneylerle hesaplanmıştır. 1864'yılında barut yandığı andaki enerji eşitliğinin hesaplamasını bulan bilim adamı Resal olmuştur [28]. 20 yüz yıl da adli balistik bilimi literatüre kazandırılarak çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Devam eden süreçlerde ise namlunun içindeki setlerin kıvrımını ölçen Helixometer geliştirilmiştir[27].

Balistik biliminin dört ana bölümü iç balistik, geçiş balistiği, dış balistik ve terminal balistiği olarak incelenir, fakat savunma sistemlerinde kullanılan balistik metotlar üç kategoride incelenmektedir[29]. Bunlar; İç balistik, Dış balistik ve Terminal Balistik olarak sınıflandırılmaktadır.

1.10.1. İç Balistik

Mermide ateşlenme ile başlayıp namludan çıktığı ana kadar geçen süre ile ilgilenen balistik sınıfı İç balistiktir. İç balistiğin ana amacı mermide istenilen ilk hızı

sağlayabilmektir. İç balistik kullanılmış olan barutu ve yanma halini, bu yanma sonucunda oluşan basıncın kontrolünü, namluda ilerleyen mermi hızını, merminin namlu boyunca girdiği dinamik etkileşimlerinin tamamını irdelemektedir[30],[31]. Sevk barutunun yanma prosesine başlaması tetikle başlamaktadır. Bu yanma sonucunda oluşan kimyasal enerji yavaş yavaş ısı enerjisine dönüşmektedir. Bu ısı enerjisi yanma odasındaki basıncı yükselterek oradaki sıkışan hava mermide baskıya ve itme gücüne dönüşür. Devamında kullanılan mermide yiv mevcutsa bu mermiye dönerek hareket kazandırılmış olunur. Kısaca barutun yanmasıyla sonuç olarak mermide kinetik enerji oluşmaktadır[32]. Özetle bir merminin namludan çıktığı andaki toplam enerjinin dağılımı aşağıdaki tabloda verilmiştir.[33].

Tablo 1. 3. Merminin Namludan Çıktığı Andaki Sahip Olduğu Enerjinin Yaklaşık Dağılımı

AŞAMALAR	YÜZDELİK ORAN
Mermi Hareketi Yüzdeliği	**%32**
Sürtünme Kayıpları Oranı	**%3**
Sevk Barutu Gazlarında Isı ve Basınç Şeklinde Geriye Kalan Enerji	**%42**
Sevk Barutu Gazlarının Hareketi	**%3**
Silahın ve Merminin Isınması	**%20**

1.10.2. Dış Balistik

Dış balistik namludan çıkan merminin hedefe ulaşana kadarki süreçte oluşan durumları inceler [28]. Dış balistiğin alt kategorileri merminin uçuş süresi, hedefe vardığı konum ve çarpma hızıdır. İki ana kuvvet olan yerçekimi ve hava direnci sayesinde yörünge hareketleri değişmektedir. Havanın sıcaklık parametresi, merminin şekli, yatayla yaptığı açı koordinatı gibi unsurlar da merminin hedefe çarpma hızını etkilemektedir [34],[35].

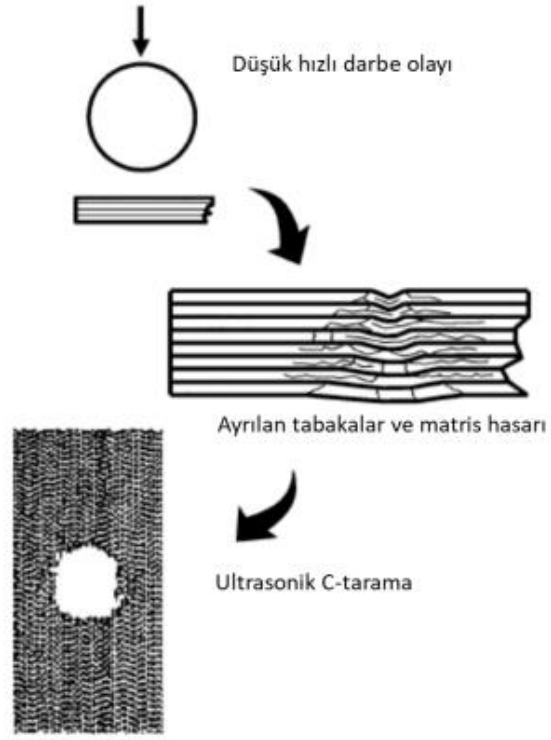
1.10.3. Terminal Balistik

Mermilerin atış sonrası atış yapılan hedefte oluşan etkileri ve hususları irdeler. Bu hususlar; zırhların delinerek deformasyona uğraması, parçacık tesiri, yanma ve

patlamalar sonucu hedefte meydana gelen mekanik hasarlar, mermide oluşan enerji kayıplarını, sis oluşumu, zehirli gazlar ve bu gazların sebep olduğu radyoaktif etkilerdir[31]. Mermi ve hedef etkileşimi ile oluşan hususlar ise ; merminin hedefe çarpma hızına, çarpma acısına, malzemesine, hedef malzemenin kalınlığına, eğiklik açısına ve mekanik özelliklerine göre değişmektedir [36].

1.11. Balistik Darbe Mekaniği

Balistik darbe hakkında geçmişten bugüne dek önemli bir araştırma konusu olarak çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Balistik darbe mekaniği, çarpışma sırasında oluşan tepki kuvvetleri sonrası, bu yapılardın anılan kuvvetlere olan dinamiksel olarak cevabını irdelemektedir. İki farklı cisim çarpıştıktan sonra yüzey alanlarındaki temas yüzeylerinde büyük boyutta olmayan bir basınç oluşumu gözlenir. İlk anlarda birbirine temas eden nüfuziyet oranı artmasıyla kuvvet de doğru orantılı olarak artar. Bu iki cisimde temas kuvvetleri sayesinde süratlerinin sıfıra düşmesini sağlayarak, çarpışma ve sıkışma aşamalarında ortamda oluşan enerji sayesinde iki cisim birbirinden ayrılmaktadır. Bu devam eden süreçte ise iki farklı cisim birbirinden belirli bir hızda ayrılma sürecine girerler. Çarpışmaların seviyesine sonucuna göre deformasyon oranları oluşmaktadır. Eğer çarpışma düşük hızda gerçeklemiş ise küçük boyutlarda deformasyonları meydana getiren temas basınçları oluşur. Bu oluşan deformasyonlar temas yüzeyi yanında ihmal edilebilinecek düzeydedir. Çarpışma yüksek hızda sağlanmış ise malzemede plastik akma kaynaklı meydana gelen büyük deformasyonlar gözlenmektedir. Yüksek sertlik, Yüksek ağırlık ve hız sonucu çarpışma kaynaklı deformasyonlar büyümektedir. Düşük hızda darbeye maruz kalan bir kompozit malzemede ortaya çıkan deformasyonlar ve bu hasarlı bölgenin nerede olduğunun C tarma yöntemi kullanılarak tespiti Şekil 1.9’da sunulmuştur [11].



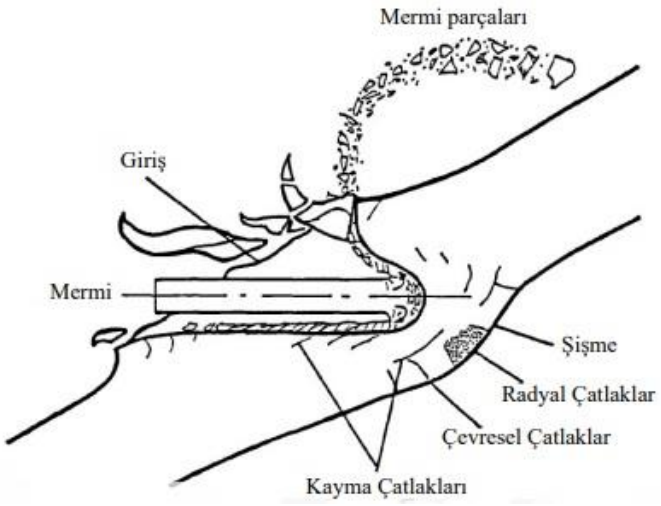
Şekil 1. 9. Darbeden dolayı oluşan ayrılmalar ve matris hasarı

Balistik nüfuziyet esnasında ortaya çıkan durumları ise matematiksel olarak analizleyebilmek büyük önem arz etmektedir. Balistik darbeye maruz kalan sistemlerde, yüksek basınçta gerilme ve şekil değiştirme kriterleri, şekil değiştirme sertleşmesi, malzemede sünek davranışa bağlı ısı etkisinde yumuşama ve devamında kırılabilme olayları gibi lineer olmayan dinamik davranışa sahip olmasından dolayı balistik darbe konusunu çalışılması kolay olmayan bir alan yapmaktadır[37]. Dolayısıyla bu karmaşık yapıyı anlamlandırabilmek için bilim adamları farklı yöntemler bulma çabasına girmişlerdir. Geliştirilen bu modeller arasında, enerjinin korunumu konusu sayesinde fiziksel tanımlamalar belirlenmiştir. Özetle mermeide oluşan kinetik enerji sayesinde neredeyse yüksek oranı deformasyon olarak hedefe aktarılmaktadır. Kinetik enerjiyi al yüksek hızda darbe ile hedefe deformasyon ve hasar vermek için kullanılmaktadır. Bu kapsamda yürütülen yüksek hızlı darbe mekaniği araştırmalarında üzerine yoğunlaşıldığı asıl konu, merminin hedefte oluşturduğu deformasyonlara karşı enerji sönümleme davranışını ve bu enerjiyi sönümlemedeki performansını iyileştirme üzerine gerçekleştirilmektedir[38].

1.12 Penetrasyon Mekaniği

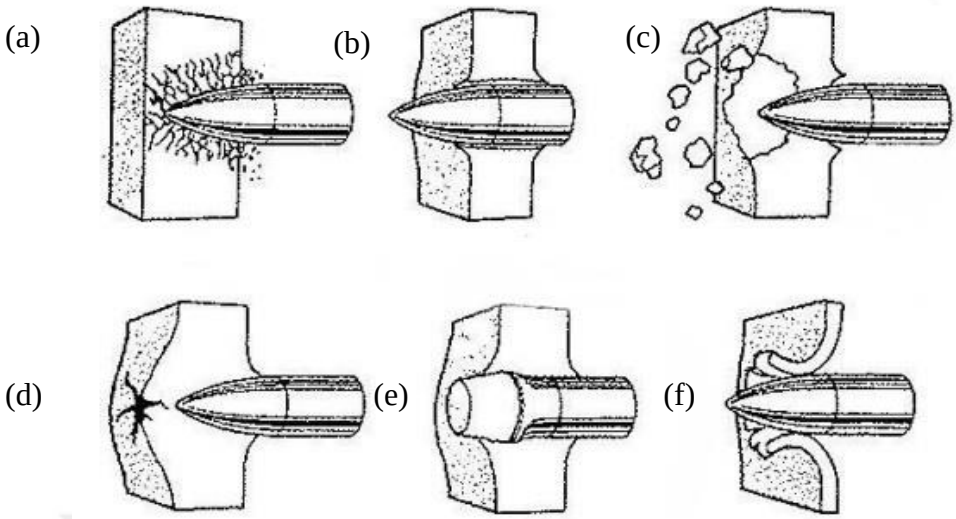
Penetrasyon mekaniği, malzeme özellikleri ile balistik performansları arasındaki bağlantıyı gösteren unsurdur. Bir merminin yada vurucu herhangi bir unsurun hedef olarak kullanılan plakanın sahip olduğu cidar boyunca içine girerek gömülmesi veya hedefe giremeyip savrulması sürecini penetrasyon inceler. Eğer mermi tarafından hedef tamamen delinmiş ise bu perforasyon sürecine dahil olmaktadır. Aynı zamanda literatürde penetrasyona nüfuziyet, perforasyona ise delinme denilmektedir [37], [39] .

Yüksek hızlı balistik çarpma esnasında merminin sahip olduğu kinetik enerjinin büyük çoğunluğu hedefte deformasyon enerjisine dönüşürken kalan enerjisinin bir kısmı ise ısı, ses ve ışık enerjisi olarak transformasyonu sağlanmaktadır. Geriye kalan diğer enerji ise hedeften kopan parçalara kinetik enerji olarak aktarılır. Bu olay kinetik enerji penetrasyon olayı olarak tanımlanmakta ve bu süreç Şekil 1.10 ‘da sunulmuştur [39].



Şekil 1. 10. Kinetik Enerji Penetrasyonu Süreci

Merminin hedefe ulaştıktan sonraki hedefte görülebilecek bütün hasar mekanizmaları aşağıdaki şekilde gösterilmiştir[40].



Şekil 1. 11. Hedef olarak Levha Kullanımı Sonrası Levhalarda Oluşan En yaygın Deformasyon Çeşitleri

(a) Gevrek Kırılma (b) Sünek Delinme (c) Parça Kopması (d) Radyal Çatlak Oluşumu (e) Tıkaç Oluşumu (f) Taç Yaprağı Oluşumu

1.13 Literatür Araştırması

Bu bölümde, Poliüre ve çeşitli kompozit malzemelerin balistik darbe dayanımı davranışlarına yönelik literatürde yapılan çalışmalar sıralanmıştır;

Yıldırım M. [18] yapmış olduğu deneysel çalışmada alüminyum, paslanmaz çelik ve DKP sac levhaya üç farklı kalınlıkta poliüre kaplaması uygulayarak, metal-poliüre çok katmanlı zırh sisteminin mekaniksel davranışları incelenmiştir. Yürütülen çalışmada hafif olması yönünden alüminyum, paslanmaz çeliğin sertliğinin yüksek olması ve maliyeti yüksek olmayan olan endüstriyel kullanımlı sac levhalar (DKP)seçilmiştir. Levhalar 4 mm kalınlıkta ve 25x25cm ölçüde kesilerek ve levhaların arka yüzeylerine üç farklı kalınlıkta (2mm, 3mm, 4mm) poliüre uygulanması yapılmıştır. İşlemleri tamamlanan malzemelere çekme deneyi ve ağırlık düşürme testi uygulanarak metal levhaların darbe direncine kaplama yöntemi ile kazandırılan özellikler belirlenmeye çalışılmıştır. Yapılan araştırma neticesinde P-316 levha tipinin en yüksek çekme dayanımına sahip olduğu, Al-5083 levha tipinin ise en yüksek enerji absorpsiyon

değerine sahip olduğu gözlemlenmiştir. Poliüre kaplama sayesinde levhaların darbe dirençlerinin ve enerji soğurma kabiliyetinin arttığı raporlanmıştır.

Abdulwahap M. ve arkadaşları [41] yürüttükleri mevcut çalışmada kullanılan numuneleri farklı özelliklere sahip üç farklı poliüre ile kaplamışlardır. Malzemeye yapılan poliüre kaplamasından sonra numunenin çekme mukavemeti, süneklik, UTS'de gerilme, maksimum eğilme yükü ve tokluk gibi mekanik özelliklerindeki oluşabilecek farklılıkları tespit edebilmek adına çekme ve eğilme testleri gerçekleştirilmiştir. Poliüre kaplama sonrası alüminyum köpükte meydana gelen nihai çekme gerilimi, malzemenin sünekliği, uzaması ve kırılma tokluğunda önemli ölçüde arttığı tespit edilmiştir. Yapılan çalışma neticesinde alüminyum köpük ve üç boyutlu PLA baskılı numunelere yapılan farklı poliüre kaplamaların her iki malzemede de mekanik özelliklerindeki olumlu etkisi ortaya konmuştur.

Yuexin Jiang ve arkadaşları [42] tarafından yapılan çalışmada Poliüre kaplı çelik plakaların silindirik bir çekicin düşük hızlı darbesine tepkisi üzerine deneysel ve sayısal araştırmalar yapılmıştır. Düşük karbonlu çelik levhalar poliüre kaplanarak darbe dayanımlarına olan etkisini araştırılmıştır. Poliüre-çelik kompozit plakalar, ağırlık düşürme makinesi kullanılarak küt ağızlı silindir yapıda olan çekiç ile darbeye maruz bırakılmıştır. Sonlu eleman kodu LS-DYNA kullanılarak sayısal simülasyonları yapılarak sonuçlar deneylerle karşılaştırarak doğrulanmıştır.Yapılan deneylerden alınan sonuçlara göre, poliüre kaplamaların çelik plakaların nihai enerji emme kapasitesini önemli ölçüde geliştirebileceğini göstermiştir. Kompozit plakaların aynı kalınlıklarda poliüre ile kaplanması sonucunda nihai enerji sönümleme kapasitesi en fazla üst tarafı kaplı plaka, devamında çift tarafı kaplı plakalar ve son olarak alt tarafı kaplı plakalar olarak değerlendirilmiştir. Enerji sönümleme kapasitesini ölçmek için Ed parametresi kullanılarak en yüksek Ed değeri üst tarafı 4mm poliüre kaplı kompozit plakada tespit edilmiştir. Çelik levha üzerindeki gerilim konsantrasyonundaki azalma ve erken kırılmayı önleme, levhaların üst tarafına poliüre kaplandığında ortaya çıkmıştır. Yapılan deneyler sonrası çelik levhalara poliüre püskürtülerek kaplanması sonrasında darbe direncinin arttığı sonucuna varılmıştır.

Ackland ve arkadaşları [43] patlayıcı yük altında çelik malzemenin patlama ve darbe direncine yönelik davranışları incelemek maksadı ile poliüre kaplı ve kaplamasız levhalar kullanarak çalışmalar yapmışlardır. Polimer kaplama, kare şeklindeki çelik levhaların darbe alacak yüzeyinin arka kısmına uygulanmıştır. 6 mm'lik kaplama yapılmayan çelik levha için 4,7 g/cm2 'lik bir alan hacmi belirlenerek, 4 mm ve 5 mm'lik numunelere ise Poliüre kaplanmıştır. Poliüre kaplanan ve kaplamasız numuneler patlama enerjisine maruz bırakılarak ANSYS AUTODYN ile sayısal olarak modellenmiştir. Çalışmada neticesinde elde edilen bulgular, belirli bir alan yoğunluğu dahilinde kalın çelik plakanın, patlama hasarının azaltılmasında Poliüre kaplanmış ince çelik plakadan daha fazla tesirli olduğunu kanıtlamıştır. Buna ilaveten çelik levhalara Poliüre kaplamanın yapılması ile plakalarda görülen deformasyonun azaltılmasının, plakanın rijitliğinde gerçekleşen olabildiğince az farklılıklara, sisteme farklı bir kütlenin eklenmesi ile meydana geldiği değerlendirilmiştir.

Mohotti ve arkadaşları [44**]** sert bir mermi darbesine maruz kalan poliüre kaplı kompozit alüminyum levhaların mekanik davranışını araştırmışlardır. Darbe enerjisinin belirli bir kısmını emmek ve darbe tarafına uygulama şartıyla bir enerji sönümleme malzemesi olarak poliüre kaplama kullanılmıştır. 6mm ve 12mm kalınlığında poliüre kaplamalı AA5083 alüminyum alaşımlı plakaların darbe etkisi altındaki davranışına yönelik inceleme yapmışlardır. Bu kapsamda 300x300mm'lik kare Al-5083 aluminyum plaka kullanarak 6 ve 12 mm lik poliüre kaplanmıştır. Bu kaplanmış plakaları 5-15 m/s'lik hız aralığında hareketi, 5 kg olan çelik merminin darbe etkisinde bırakılmıştır. Gaz tabanca mekanizması kullanılarak 5 kg'lık merminin ateşlemesi yapılmıştır. Araştırmada kaplama işleminin sönümlemeye olan etkisini ortaya çıkarmak adına aynı kalınlıktaki kaplama işlemi yapılmayan plakalara da atışlar yapılarak darbe etkisine maruz bırakılmıştır. Çalışma sonucunda yapılan deneysel modellemeler ile poliüre kaplı plakaların kaplanmamış plakalara göre düzlem dışı deformasyonda gözle görülenbilir oranda azalma gösterdiğini kanıtlamışlardır. Sonuç olarak poliüre malzemesinin düşük hız darbe hasarına karşı uygulanabilir bir yüksek enerji sönümleyici olarak tercih edilmesinin mümkün olabileceğini ispatlamışlardır. Araştırmada poliüre kaplamanın 12 mm kaplama kalınlığında yaklaşık %20'lik bir enerji absorbsiyonunu mümkün kıldığı tespit edilmiştir. Kaplama kalınlığı arttıkça darbe sönümleme başarısının da doğru orantılı olarak arttığı raporlanmıştır.

Grujicic ve arkadaşları [45] tarafından yürütülen çalışmada poliüre malzemesinin camsı geçiş sıcaklığı ile deformasyonu arasındaki enerji dağılımı ilişkisini irdelemişlerdir. Bu kapsamda mermi ile kaplanmış plaka davranışlarını sonlu elemanlar analizini gerçekleştirmişlerdir. Çalışma sonrasında, enerji emilimini boyutunu değerlendirerek uygulanan çarpma koşullarının fonksiyonu olarak test plakasının deformasyonunu belirlemişlerdir. Sonuç olarak çarpma koşulları altındaki Poliürenin mekanik tepkisi ve davranışının, camsı geçiş sıcaklığı ile test sıcaklığı arasındaki farkın hayli küçük boyutta olduğunu kanıtlamıştır. Buna ilaveten bu aradaki farkın büyük olması durumunda Poliüre malzemesinin yüksek süneklilik davranışını gösterdiği, ancak test sıcaklığı camsı geçiş sıcaklığına yakın olduğu takdirde ise Poliürenin deformasyon anında camsı durumuna dönüşme eğilimine girdiğini açığa çıkarmışlardır. Poliüre malzemesinin sergilemiş olduğu bu davranışının viskoz tip durumunda enerji dağılımı ile ilişkili olduğu çalışmada gözlemlenmiştir. Buna ek olarak ilave enerji emici sistemlerin, poliüre malzemesinin yüksek balistik ve patlama enerjisi koruma kabiliyetine katkıda sağlayabileceği belirtilmiştir.

Zhijun Wang ve arkadaşları [46] yapmış oldukları çalışma ile parçacık etkisine maruz kalan poliüre kaplı çelik levhaların balistik direncini deneysel olarak incelemişlerdir. Düşük karbon alaşımlı çelik levhalar poliüre ile kaplanarak kübik parçaların atışları ile darbeye maruz bırakılmıştır. Yapılan atış testleri ile poliüre kaplı çelik levhaların balistik direncini araştırmak amacı ile birtakım deneysel çalışmalar yürütmüşledir. Çelik levhaların ön, arka ve her iki yüzeyine düşük ve yüksek sertilkte olmak üzere poliüre malzemesi kaplanmıştır. Kullanılan çelik malzemesinin ve poliüre malzemesinin kalınlığı her üç deney koşulunda da aynıdır. Bu çalışmalar ile malzemelerin farklı konfigürasyonlardaki balistik performansını değerlendirmek amacı ile balistik limitleri belirlenmiştir. Devamında ise enerji emilimleri hesaplamıştır. Kullanılan çelik levha ve poliürenin yapılan atışlar sonrası deformasyonları farklı kaplama türleri ve pozisyonlarında değerlendirilmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda, poliüre kaplamanın hedef plakanın balistik limitini iyileştirebileceği ve ön tarafında yüksek sertlikte poliüre kaplı plakanın ise en iyi balistik direnci sergilediğini gözlemlemişlerdir. Farklı poliüre türleri için ön kaplamalı çelik levha, arka kaplamalı levhaya göre daha iyi balistik

performans sergilemiştir. Yaptıkları çalışma ile poliüre kaplı levhaların mühendislik alanındaki uygulamalarda tasarım alanında rehberlik sağlayacağını göstermişlerdir.

Mohotti ve arkadaşlarının [47] yapmış olduğu bir diğer çalışma ise poliüre malzemesi ile kaplanmış alüminyum plakaları yüksek hızlı mermi penetrasyonu altında incelenmesidir. Yapılan deneylerde farklı Poliüre kalınlıklarının, mermi hızı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. 10 metre mesafaden 945 m/s'lik sabit hızda kaplanmış Alüminyum levhalara çelik uçlu 5,56'lık (5.56 × 45 mm) mermi ile atışlar yapılmıştır. 7 farklı kalınlıklarda plaka konfigürasyonları kullanılmıştır. Plakalardaki her konfigürasyon 6 mm- 12 mm poliüre katmanları ve 5mm-8 mm (AA5083-H116) taban plakalarından oluşturulmuştur. 5,56'lık mermi ile yakın mesafeden atış yapılara giriş çıkış hızları iki lazerli hız sensörleri ile ölçülmüştür. Poliüre malzemesi ile kaplamanın verimliliğini araştırmak için, hızın azaltılması, hasar mekanizması, plakaların kinetik enerji emilimi incelenmiştir. Yapılan deney çalışmaları sonrası Alüminyum plaka ile enerjisinin belli bir miktarını kaybeden mermide geriye kalan enerjinin, Poliüre katmanı tarafından emildiği gözlemlenmiştir. 6 mm kaplama tarafından absorplanan toplam enerji, 12 mm kaplama tarafından emilen enerjinin yarısına denk gelmektedir. Bu sonuçlar ile Poliüre kaplamanın kompozit sistemin enerji emilimin mermerilerin kalıntı hızının azaltılmasında (yani parçacık kalkanı olarak kullanımı) katkısı açıkça görülmektedir.

Samiee ve arkadaşları [48] Poliüre malzemesinin çelik levhaların patlama yükleri altındaki performansı üzerindeki etkisinin sayısal olarak araştırmışlardır. Patlama ve darbeye maruz kalan 1 m çaplı dairesel DH-36 çelik levhaların ve DH-36 çelik-poliüre kaplı çift tabakaların dinamik davranışlarını ve malzemelerde oluşan deformasyona ilişkin sayısal simülasyonlar oluşturularak sonuçlarını karşılaştırmışlardır. Farklı poliüre kalınlıkları kullanılarak, bu kalınlığın çelik levhaların patlama/darbe yükleri altındaki performansı üzerindeki etkisi irdelenmiştir. Her bir poliüre kalınlığı için üç durum belirlenmiş ve (1) ön yüzde (yükleme yüzü) dökme poliüre; (2) arka yüze dökülmüş poliüre (aynı kalınlıkta); ve (3) alan yoğunluğu her üç durumda da aynı olacak şekilde uygun kalınlıkta çelik levhalar kullanılarak deney simüle edilmiştir. Poliüre-çelik sistemine; (1) çift katmanlı sistem üzerine doğrudan basınç uygulaması, (2) ayrı bir ortam (yumuşak poliüretan veya su) yolu ile basınç uygulaması yapılarak iki tür yükleme uygulanmıştır. Simüle edilen deney sonuçlarına göre plakanın arka yüzeyine

yeterli kalınlıkta poliüre tabakası döküldüğünde, çift tabakanın diğer iki duruma göre üstün performans gösterdiğini gözlemlemişlerdir. Poliüre kalınlığı arttıkça farklılıkların, (deformasyonlara olan etkisini sönümleme vb.) daha belirgin hale geldiği tespit edilmiştir.

Yehia A. ve arkadaşları [49] poliüre kaplı ara katmana sahip patlamaya dayanıklı sandviç plaka tasarımı üzerinde farklılıklara yönelik araştırma yürütmüşlerdir. Bu çalışma ile patlama yüklerine maruz kalan geleneksel (konvensiyonel) sandviç ve ara tabakaya poliüre eklenerek değiştirilmiş sandviç plaka tasarımlarının uygulamasını yapmışlardır. Öncelikle konvansiyonel sandviç tasarım bir yapısal köpük çekirdek tabakasıyla birbirinden ayrılmış, lifli laminatlardan yapılmış ince dış (yüklü taraf) ve iç yüzey tabakalarından meydana gelmektedir. Değiştirilmiş ve asıl çalışmanın konusu olan tasarım ise (2), dış yüzey tabakası ile köpük iç kısım arasına ince bir poliüre ara katman eklenmiş halidir. Karşılaştırılan iki tasarımda; ilk adımda sürekli bir plakanın tek bir açıklığına uygulanan 0,05 ms süren bir basınç darbesiyle başlatılan ve devamında 5 ms'lik uzun bir periyod boyunca uygulanmıştır. İlk karşılaşılan tepki sürecinde geleneksel tasarımda, gelen sıkıştırma dalgası tarafından etkili ölçüde köpük çekirdeğin kırılmasına sebep olduğu gözlemlenmiştir. Bu ortaya çıkan hasarın, ara katmanın sertleştirilmesi ile dış yüzey tabakasına destek sağlayan ve stres dalgalarının köpük çekirdeğe yayılmasını değiştiren şok sıkıştırma altında poliüre ara katmanının sertleştirilmesi ile büyük oranda azaltığını tespit etmişlerdir. Sonuç olarak poliüre ara katmanlı sandviç plakanın kullanımı, uzun vadeli eğilme tepkisine yararlı olduğu ve ve ön yüzey gerilmelerinde ve genel sapma açısında da önemli azalmalar sağladığı görülmüştür. Değiştirilmiş sandviç plakanın toplam kinetik enerjisi konvensiyonel olarak tasarlanmış bir plakanınkinden önemli miktarda düşük olduğu sonucuna varmışlardır.

Hazell ve arkadaşları [50], geliş açısı normal ve 45° açılı şeklinde, 170- 374 m/s değişen hız aralığında çelik küre yapılarının 3mm ve 6 mm kalınlıktaki karbon fiber tabakalı kompozit kumaşları darbe 46 testine maruz bırakmışlardır. Reçine enjeksiyon kalıplama yöntemi kullanılarak 3 mm ve 6mm kalınlıktaki numunelere sırası ile 8 katman ve 16 katman olarak uygulanmıştır. Yapılan atış deneylerinde hedefin kinetik enerjisindeki farklılıklar, perferasyon mekanizmaları ve hedef eğiminin tesiri

irdelenmiştir. Devamında bu hedeflerde meydana gelen deformasyonlar yorumlamıştır. Deneyler sonucunda, çelik küre yapının kinetik enerjisinin, birebir kalınlıkta normal geliş açısıyla konumlandırılan hedeflere göre karşılaştırılmasıyla 45°lik eğik bir geliş açısıyla konumlandırılan numunelere göre daha fazla transfer sağlandığını tespit etmişlerdir. Ek olarak 6mm kalınlıktaki numunelerde, darbe enerjisinin artması ile plakaya transfer edilen enerjinin de doğrusal olarak azaldığı gözlemlenmiştir.

Harper ve arkadaşları [51] kompozitlerdeki mevcut olan tabakalar arası ayrılmalar ve kopmalar içim arayüzey elemanı analizlerinde, en fazla ara yüzey gerilmesinin tesiri üzerine kapsamlı bir çalışma yapmışlardır. Arayüzey elemanları ile soğurulan enerji, kırılma/kopma mekaniği analizlerinden çıkan çatlak ucu şekil değiştirme enerjisi hızı ile karşılaştırılmıştır. Bulguların lineer elastik kırılma mekaniği çözümleri ile benzer bir sonuca sahip olduğunu raporlamışlardır.

Raman ve arkadaşları [52] tarafından yapılan amprik çalışmada; yüksek hızda ve bir dizi tek eksenli çekme yükleri altında poliürenin mekanik davranışlarını incelemişlerdir. Yaptıkları çalışmalar sonucunda; poliürenin gerilme-şekil değiştirme eğri grafiklerinin doğrusal olmadığını, hızlara göre farklılık gösterdiği sonucuna varmışlardır. Ek olarak çekme hızı arttıkça poliüre malzemesinin young modülünün arttığını gözlemlemişlerdir.

Mines ve arkadaşları [53] üç noktalı eğilme altında polimer kompozit sandviç kirişlerin enerji soğurma kabiliyetini anlayabilmek için elastik-plastik kiriş eğilme modelini geliştirmişlerdir. Kiriş kaplamalarında cam elyaf, çekirdekte ise coremat (reçine emdirilmiş dokuma olmayan polimer) tercih edilmiştir. Kiriş için lineer olmayan kuvvet-yer değiştirme hususlarının deneysel ölçümlerini, modelin teorik sonuçları ile kıyaslamışlardır. Sonuç olarak yapılan çalışma ile çekirdeğin kayma davranışı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu raporlanmıştır.

Qiang Liu ve arkadaşları [54] balistik darbeye maruz kalan karbon elyaf takviyeli plastik (cfrp)/poliüre kompozit levhaların balistik direncini araştırmışlardır. 14,5 mm silindirik mermili balistik tabanca kullanımı ile poliüre kaplı karbon elyaf takviyeli plastik (cfrp) kompozitlerin balistik direncini araştırmak amacıyla darbe deneyleri yapmışlardır. Poliüre malzemesinin kaplama pozisyonunun ve kalınlığının etkisi analiz

edilmiştir. Kullanılan merminin çarpma hızı 600 m/s ile 1406 m/s arasında belirlenerek Poliüre kaplı cfrp kompozit levhalara atış gerçekleştirilmiştir. Balistik davranışı değerlendirmek için enerji emilim oranları ve cfrp plakalarda oluşan deformasyonlar bölgeleri ultrasonik C-tarama ile tespit edilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda cfrp kompozitlerin arka tarafına poliüre püskürtülürken kompozit plakaların balistik performansını önemli ölçüde artırılabilineceği raporlanmıştır.

Sazhenkov ve arkadaşlarının [55] yapmış oldukları çalışmada dokuma cam elyaf takviyeli laminatın darbe performansı üzerindeki poliüre kaplamanın etkisi araştırılmıştır. Balistik deney düzeneği olarak pnömatik tabanca kullanılmıştır. 23,8 mm çapında ve 54,7 g ağırlığındaki çelik mermi ile 150 m/s çarpma hızı aralığında 200 mm x 300 mm x 8 mm boyutlarındaki 11 adet polimer kompozit hedefe dikey olarak atış yapılmıştır. Hedeflerin ön ve arka yüzlerinde 1,2 mm koruyucu kaplama bulunan hedefler ile koruyucu kaplaması yapılmayan numuneler için balistik limitin karşılaştırması yapılmıştır. Darbe süreci, iki yüksek hızlı kamera kullanılarak kaydedilmiştir. Ön ve arka yüzeylerde kaplanma yapılmamış numunelerden ve poliüre kaplı cam elyaf levhaların balistik limiti ile ilgili deneysel veriler raporlanmıştır. Bu sonuçlara bakıldığında 1,2 mm kaplama kalınlığı ile balistik limitin %20 arttığı gözlemlenmiştir.

Şen M. ve arkadaşlarının [56] yapmış olduğu çalışmada poliüretan köpük kaplanmış plakalarda takviye kalınlığının sistemin dinamik performasına etkisini ele almışlardır. Mühendislik alanında önemli ölçüde kullanımı olan plak yapılarına, üretim maliyeti oldukça düşük, hafif, her sisteme uygulanabilirliği ve uygulama metodu kolay olan poliüretan köpük kullanılarak plaklarda titreşim yalıtımı yapılması amaçlanmıştır. Deney sonuçları ANSYS ile neticelendirilen tespit deney sonuçları ile karşılaştırılarak doğrulanmıştır. Bu kapsamda farklı poliüretan ile takviyelendirilmiş kalınlıklarında sistemin dinamik performasına tesiri deneysel modal analiz yöntemi ile incelenerek olumlu yönde sönümleme kabiliyetinde artış gözlenmiştir.

Harikumar ve arkadaşları [57] Poliüre (PU) kaplı Alüminyum sandviç kompozit ve hafif çeliklerle hazırlanan numunelerin balistik darbe etkisi altında davranışını incelemişledir. Yürütmüş oldukları bu çalışma ile 1,8 mm'den 2,6 mm'ye kadar farklı kalınlıklarda PU kaplı numuneleri kullanmışlardır. PU kaplı Alüminyum ve hafif çelik katmanlı

kompozitler, püskürtme yöntemi ile hazırlanmıştır. Oluşturulan numunelere mekanik darbe testleri gerçekleştirilerek; sertlik, geri tepme esnekliği, çekme ve düşük hızlı darbe testleri vb özellikleri irdelenmiştir. Elde edilen bulgular sonucunda PU kalınlığı arttıkça mekanik özellikler de aynı oranda arttığı gözlenmiştir. PU kaplamanın malzemenin mekanik özelliklerini iyileştirdiği tespit edilmiştir. Aynı zamanda PU kaplanmış hafif çelik, PU kaplı Alüminyum sandviç kompozitlerden daha üstün mekanik özellikler sergilediği sonucuna varmışlardır.

Stergiou ve arkadaşlarının [58] yürütmüş olduğu çalışmada parçalı bir poliüre malzemesi için sonlu elemanlar yöntemi ile özel malzeme modeli geliştirilerek tanımlamışlardır. Yapılan ampirik çalışmalarda ön poliüre tabakası kaplı olan ince metalik plakaların balistik performansındaki davranışları sayısal çalışmalarla irdelenmiştir. Polimer kaplamalı bir hedefin balistik performansındaki artış, yapılan deneysel çalışma ile tutarlı olduğu doğrulanmıştır. İnce yekpare plaka üzerinde 4 mm'den daha yüksek ön katman kalınlıkları için poliüre kalınlığındaki milimetrelik artış başına 7,4 m s-1'lik bir balistik sınır iyileştirmesi raporlanmıştır. Elde edilen bu sonuç ile darbe hızına, polimer kalınlığına ve arayüz etkileşimlerine poliüre tabakasının eklenmesiyle ince plakaların enerji sönümleme kapasitesindeki önemli iyileştirmeyi kanıtlamıştır.

Karabayır B, ve arkadaşları [59] lif desteli poliüretanlar geliştirerek temel mekanik özelliklerini bozunma modları ile türetmişlerdir. Özel bir üretim metodu geliştirilerek yüksek modüllülif/ poliüretan yapıların üretilebileceği başarılı bir şekilde kanıtlanmıştır. Lifli ve lifsiz olmak üzere iki farklı poliüretan malzemesi ile deneyler yaparak, lifli/poliüretan yapıların eğme/bükülme dayanımları ve kayma dayanımları lifsiz/polüretana kıyasla yüksek çıktığını gözlemlemişlerdir.Lfli yapıların lifsiz poliüretana göre panel enerjilerinin 17 kat fazla olduğu tespit edilmiştir. Lifli poliüretan yapıların mekanik özelliklerinin lifin cinsi, hacmi ve doğrultusuna bağlı olarak performasını büyük oranda değiştirdiği raporlanmıştır. Lif yönleri tek yönden dört yöne doğru değiştikçe bozunma modları değişerek bu alanların azaldığı tespit edilmiştir. Bu çalışma sonunda elde edilen sonuç poliüretan yapılara lif takviyesi yapılarak oluşabilecek hasar toleranslarının iyileştiği kanıtlanmıştır.

Gökgöz O, ve arkadaşlarının [60] yapmış oldukları çalışmada zırh delici mermilere karşı tek ve çok tabakalı plakaların gösterecekleri balistik dayanımı incelemişlerdir. Çalışmanı belirli bir kısımda tahmin edilen darbe sonrası parametler kabul edilebilir doğrulukta çıkmıştır. Hali hazırda tek katmanlı hedef yerine eşit ağırlığa sahip çok tabakalı numunenin kullanılmasının avantajları halen belirsizlik göstermektedir. Fakat çok katmanlı hedeflerde eşit ağırlığa sabit tek katmanlı hedefe göre kıyaslamak amacıyla sayısal bir model Autodyn programı ile geliştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar ile teorik ve sayısal analizler karşılaştırılmıştır Bu yapılan çalışmalar sonucunda çok katmanlı hedeflerde katmanların kalınlıkları azaldıkça darbe dayanımlarının azaldığı ve tek katmanlı darbe dayanımlarının ise daha yüksek olduğu sonucuna varılmıştır.

2. BÖLÜM

YÖNTEM VE MATERYAL

Bu bölümde, poliüre kaplı kompozit plakalarının yüksek hızlı darbe testleri açıklanmıştır. Poliüre kaplı kompozit plakalarının yüksek hızlı darbe davranışını belirlemek için tek kademeli bir gaz silahı kullanılmıştır ve balistik davranışı tahmin etmek için kompozit plakalarının balistik davranışlarını belirlemek için yüksek hızlı kamera kullanılarak deformasyon davranışı belirlenmiştir.

2.1. Materyal

Son yıllarda polimer kaplı kompozit teknolojileri alanındaki gelişmelere bağlı olarak günümüzün hafif balistik koruma sistemleri geliştirilmiştir. Kişisel vücut zırhlarını hafifletmek, zırhlı araçların zırhlanmasında performansı arttırmak, balistik zırhların travma derinliğini azaltmak ve enerji emme yeteneklerini geliştirmek amacıyla farklı tip, boyut ve geometrilerde polimer kaplı tekstil ürünlerine uygulanmaktadır. Bu durumda kullanıcının savunma güvenliği ve hareketliliği düşünüldüğünde polimer kompozitlerdeki gelişmeler kritik önem taşımaktadır. Koruyucu zırh malzemeleri üzerine yapılan araştırmaların çoğu, aramid liflerinin balistik darbelere karşı direncini artırmak üzerine olmuştur.

Tez çalışması kapsamında aramid kompozit levhaların balistik darbe davranışına poliüre kaplamasının etkisi araştırılmıştır. Aramid kompozit plakalar, aramid elyafların polimer matris malzemeleri ile birleştirilmesiyle oluşan kompozit malzemelerdir. Aramid elyaflar, yüksek mukavemet ve düşük yoğunluk gibi özellikleri nedeniyle, savunma ve güvenlik sektörlerinde sıklıkla kullanılan yüksek performanslı elyaflardandır. Polimer matris malzemeleri ise genellikle epoksi, polyester veya vinil ester polimerleri gibi

malzemelerdir. Aramid kompozit plakalar, yüksek mukavemet, düşük yoğunluk, yüksek sertlik ve iyi darbe dayanımı gibi özelliklere sahiptir. Bu özellikler nedeniyle, aramid kompozit plakalar sıklıkla balistik koruma amaçlı olarak kullanılmaktadır. Örneğin, zırhlı araçlarda, uçaklarda ve helikopterlerde kullanılan zırh panellerinde, vücut zırhlarında ve diğer balistik koruma uygulamalarında kullanılabilirler. Aramid kompozit plakaların üretimi genellikle kalıpla şekillendirme, sargılı sarım veya vakum infüzyon gibi imalat yöntemleriyle gerçekleştirilir. İmalat sırasında, aramid elyaflar öncelikle istenen şekil ve boyutlarda kesilir ve ardından polimer matris malzemesi ile birleştirilir. Bu işlem sırasında, aramid elyafların doğru yönde ve şekilde yerleştirilmesi, plakanın mukavemetini ve performansını etkileyebilir. Aramid kompozit plakaların avantajları arasında yüksek mukavemet ve hafiflik bulunurken, dezavantajı ise yüksek maliyetidir. Ayrıca, aramid kompozit plakaların kimyasal mukavemetleri de kısıtlı olabilir ve aşınmaya karşı daha az dirençli olabilirler.

Aramid kompozitlerin poliüre kaplaması, aramid kompozit plakaların yüzeyine poliüretan kaplama uygulanması anlamına gelir. Poliüretan (PU), sentetik bir polimer malzemesidir ve genellikle yüksek dayanıklılık ve aşınma direnci gerektiren uygulamalarda kullanılır. Poliüretanlar, sertleştiriciler, reçineler ve dolgu malzemeleri gibi çeşitli bileşenlerin karışımından oluşan termoset bir malzemedir. Aramid kompozitlerin poliüre kaplaması, plakanın yüzeyine ekstra bir koruyucu tabaka ekler. Bu tabaka, aramid kompozit plakaların darbe dayanımını arttırır ve yüzeylerini çizilmelere, çatlaklara, kimyasallara ve UV ışınlarına karşı korur. Ayrıca, poliüre kaplama aramid kompozit plakaların yüzeyinde daha iyi bir tutunma sağlayabilir ve onları kaygan veya yağlı yüzeylerde bile tutarlı bir şekilde tutar. Poliüretan kaplamalar, genellikle sprey veya rulo ile uygulanır. Uygulama sırasında, kaplama malzemesi, aramid kompozit plakanın yüzeyine ince bir tabaka halinde uygulanır ve daha sonra kurumaya bırakılır. Kuruduktan sonra, kaplama malzemesi bir sert, dayanıklı ve elastik tabaka oluşturur.

Poliüre kaplamalar, sert, dayanıklı ve aşınmaya dayanıklı yüzeyler gerektiren birçok uygulamada kullanılır. Bu nedenle, aramid kompozit plakaların poliüre kaplaması, özellikle askeri ve endüstriyel uygulamalarda sıklıkla kullanılmaktadır.

Balistik dayanımı yüksek poliüre kaplamalar, genellikle savunma ve güvenlik sektörlerinde kullanılan zırh ve koruma sistemlerinde kullanılır. Bu kaplamalar, aşınmaya, darbelere, çizilmelere ve kimyasallara karşı dayanıklıdır ve aynı zamanda yüksek enerjili darbelere karşı yüksek direnç gösterirler. Aşağıdaki alanlarda kullanılabilirler:

- Zırh Plakaları: Zırh plakaları, savaş sahalarında askerlerin vücutlarını mermi ve şarapnel gibi yüksek hızlı projektilere karşı koruyan yüksek dayanıklı malzemelerdir. Bu plakaların yüzeylerine uygulanan poliüre kaplamalar, zırh plakalarının darbelere ve aşınmaya karşı daha fazla koruma sağlar.

- Araç Zırhları: Askeri araçlar, saldırılara karşı korunmak için sık sık zırh plakaları ile donatılır. Bu araçların zırh plakalarının yüzeyleri, balistik dayanımı yüksek poliüre kaplamalarla kaplanır. Bu kaplamalar, araçların darbelere, çizilmelere ve aşınmaya karşı korunmasına yardımcı olur.

- Helikopter ve Uçak Zırhları: Askeri helikopterler ve uçaklar, balistik dayanıma sahip poliüre kaplamalarla kaplanır. Bu kaplamalar, yüksek hızlı projektilere karşı koruma sağlar ve aynı zamanda yüzeylerini aşınma ve çizilmelere karşı korur.

- Korumalı Kıyafetler: Askeri personel, polis güçleri ve diğer güvenlik görevlileri, korumalı kıyafetler giyerler. Bu kıyafetlerin yüzeyleri, balistik dayanıma sahip poliüre kaplamalarla kaplanarak, daha fazla koruma sağlanır.

- Balistik Duvarlar: Güvenlik odaları ve diğer savunma sistemleri, balistik duvarlarla donatılmıştır. Bu duvarların yüzeyleri, balistik dayanımı yüksek poliüre kaplamalarla kaplanır. Bu kaplamalar, duvarların darbelere ve aşınmaya karşı korunmasına yardımcı olur.

Tez çalışmada iki farklı kalınlıkta kompozit levha tercih edilmiştir. 24 ve 28 katman sayılarına sahip 10 ve 11.6 mm kalınlıklarında Aramid kompozit levhalar 10.6 ve 12.4 kg/m^2 alansal yoğunluklara sahiptir. Poliüre kaplama kalınlığı her malzeme için 5 mm olarak kullanılmıştır. Poliüre kaplı numunelerin alansal yoğunlukları ise 24 katmanlı numune için 16.4 kg/m^2 ve 28 katmanlı numune için 18.2 kg/m^2'dır. Aramid kompozit

levhalar sıcak pres yöntemi ile üretilmiş olup 10x10 cm boyutlarında kesilmiştir. Tercih edilen malzemeler mevcut sistemlerde isterlere uygun olarak tercih edilmiştir. Tez çalışmasında kullanılan poliüre malzemesi özel bir şirket tarafından yüksek basınç altında çalışması için üretilmiştir.

Tablo 2. 1. Numune özellikleri

Katman Sayısı	Numune Boyutları	Kalınlık	Kaplama Kalınlığı	Alansal Yoğunluk-Kaplamasız	Alansal Yoğunluk-Poliüre kaplı
24 Katman	100x100 mm	10 mm	5 mm	10.6 kg	16.4 kg
28 Katman		11.4 mm		11.6 kg	18.2

2.1.1. Poliüre kaplama

Poliüretan ve/veya poliüre bazlı çift komponentli kaplama malzemeleri sahip oldukları kimyasal ve fiziksel özelliklerden dolayı günümüzde çeşitli alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadırlar. İki bileşenli bu sistemler poliol/poliamin bileşeninin izosiyanat bazlı prepolimerler ile reaksiyonu sonucu poliüretan veya poliüre polimer ağlarını oluşturur. Poliüre teknolojisinin poliüretanlara göre ana ayırt edici özelliği, genellikle polioller olarak adlandırılan hidroksil sonlu (-OH) reçineler yerine amin sonlu (-NH2) reçinelerin kullanılmasıdır. Amin sonlu reçinelerin izosiyanat bileşeni ile reaksiyonu, bir üre bağlantısının oluşmasıyla sonuçlanır. Poliüreler poliamin karışımlarının izosiyanat bazlı prepolimerler ile reaksiyonu sonucu elde edilen elastomerik yapılar olarak tanımlanmaktadır. Poliüretanlarla karşılaştırıldığında poliüre bileşenlerinin (amin ve izosiyanat) reaksiyon hızı daha yüksektir. Bu nedenle poliüretanların aksine poliüre formülasyonları katalizör gerektirmez ve çok düşük sıcaklıklarda bile kürlenirler.

Genelde jelleşme süreleri saniyelerle ölçülen poliürelerin amin ve izosiyanat bileşenlerinin doğru tasarlanmasıyla jelleşme ve kap ömrü uzatılabilir. Mikroyapısı incelendiğinde poliürelerin sert ve yumuşak segment olmak üzere iki fazdan oluştuğu gözlenmektedir. Üre bağları sert segmenti oluştururken yumuşak segmenti polieteramin zincirleri oluşturmaktadır.

Poliüre kaplama malzemelerinden beklenen genel performans kriterleri arasında yüksek uzama ve gerilme mukavemeti, düşük sıcaklıkta iyi esneklik, aşınma ve kimyasal direnci ve zorlu hava koşullarına dayanıklı olması beklenir.

Tablo 2. 2. Tez çalışmasında kullanılan poliürenin mekanik özellikleri

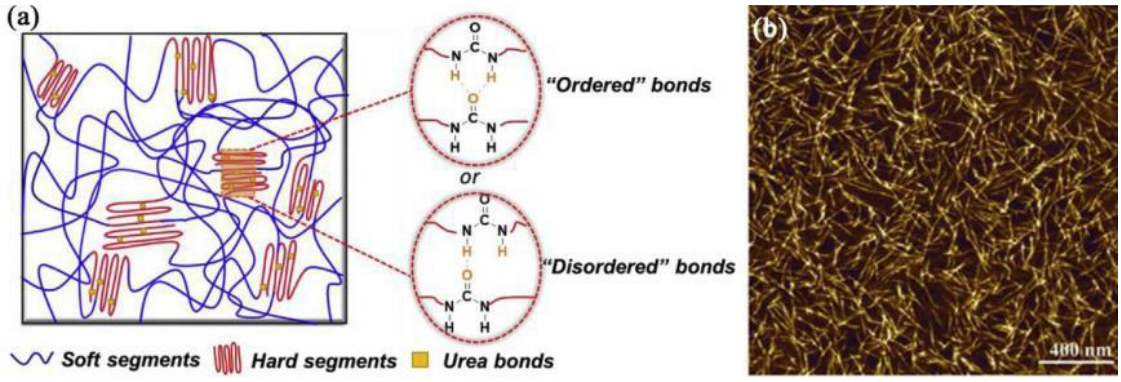
		Değer	Metod
Jelleşme zamanı	sn	3-5	İç metod
Dokunma zamanı	sn	13-15	İç metod
Sertlik	Shore A	90-100	DIN 53505
Pantolon Yırtılma mukavemeti	N/mm	30-55	ASTM D 624
Açı yırtılma	N/mm	87-97	ASTM D624
Uzama	%	500-600	ASTM D 412
Kopma mukavemeti	N/mm2	15-20	ASTM D 412

Poliüre kaplamalar özellikle kimyasallara gösterdikleri direnç ile uygulandıkları yüzeyi korozyondan korur. Kimyasal dayanım genel olarak poliürelerde mineral asitlerde düşük-orta, organik asitlerde orta, alkalilerde orta-yüksek, klorlu solventlerde düşük-orta, oksijenli solventlerde düşük-orta, hidrokarbon çözücüler için düşük-orta, tuzlar yüksek seviyededir. Poliüre elastomer sistemler amorftur bu nedenle bir camsı geçiş sıcaklığına (Tg) sahip değildir. İki farklı Tg polimerin yapısındaki yumuşak segmentin erime noktası iken diğeri de sert segmentin erime noktasına gelen Tg değerleridir. Poliüre elastomer sistemler dinamik mekanik analiz testlerinde genel olarak -50°C'de bir Tg gösterirken yaklaşık 260 °C lerde de yüksek Tg yi gösterir. Bu iki Tg arasındaki poliürenin çalışma aralığı olarak belirlenir. 1. Tg nin altında kısmi sertleşme gösterirken 2. Tg nin üzerinde bozunması beklenir.

Polyurea, izosiyanat prepolimerleri ve poliaminler arasındaki hızlı reaksiyondan sentezlenen bir blok kopolimerdir. Poliüre formülasyonu, izosiyanat ön polimerinin bileşen A olduğu ve bileşen B'nin uzun polieter aminler ve katkı maddelerinin homojen bir karışımından oluştuğu A ve B olmak üzere iki bileşenden oluşur.

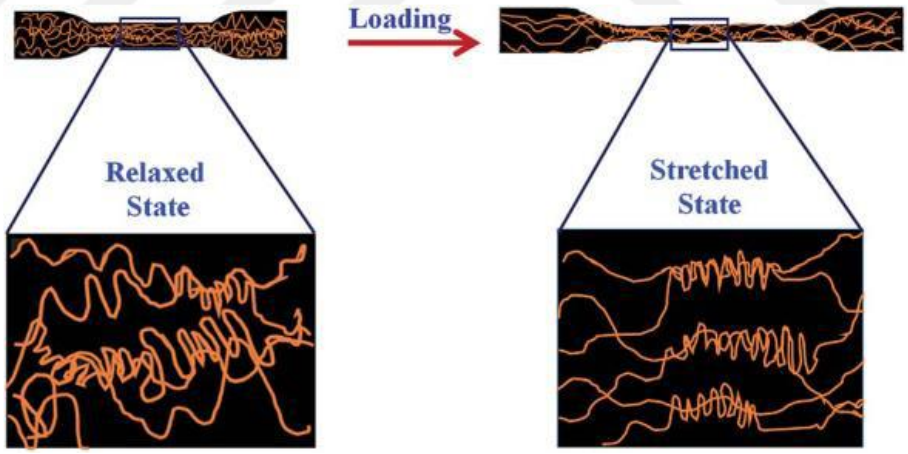
Şekil 2.1'de gösterildiği gibi yumuşak ve sert segmentlerin varlığından dolayı polimer mikro yapısında benzersiz bir mikrofaz ayrımı gözlemlenebilir. Bu mikrofazla ayrılmış yapı göz önüne alındığında, poliüre bir nano-kompozit olarak kabul edilebilir, sert segmentler bir yumuşak segment matrisinde dağıtılmış takviyeler olarak işlev görür.

Böyle özel bir mikro yapı, stabilite, yüksek mukavemet gibi mükemmel makroskopik özelliklere yol açar. [61]



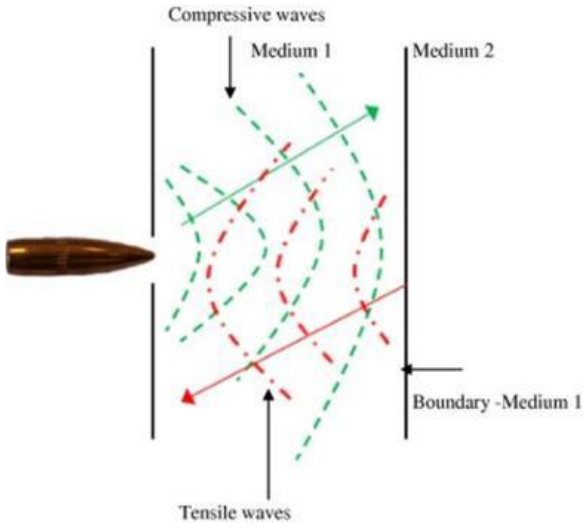
Şekil 2. 1. Polimer mikro yapısı

Yapısındaki polimer bağların mükemmel özelliği ile merminin kinetik enerjisini dağıtır ve kendi yapısında tutar. Poliürenin şok dalgası zayıflatma kabiliyetinin esas olarak sert segmentler tarafından kontrol edildiği düşünülmektedir. Şok dalgası tarafından uyarılan sert segment sıkıştırılarak regüle edilir ve gelen dalga zayıflayarak tüm alana yayılır (Şekil 2.2).



Şekil 2. 2. Poliüre yükleme durumu

Hızlandırılmış kinetik hareket karşısında, polimerin viskoelastik faz geçişine maruz kalması ve buna bağlı olarak yüksek enerji absorpsiyonu ile durdurma etkisinin gözlendiği görülmektedir. Şok dalgaları homojen malzemelerde tek bir dalga gibi davranır. Poliürede iki dalgalı bir yapı elde edilir. Yayılan (serbest kalan) dalga hızının şok dalgası hızından daha büyük olması, etkili yakalama ve nötralizasyon ile şokun azaltılmasını sağlar (Şekil 2.3).



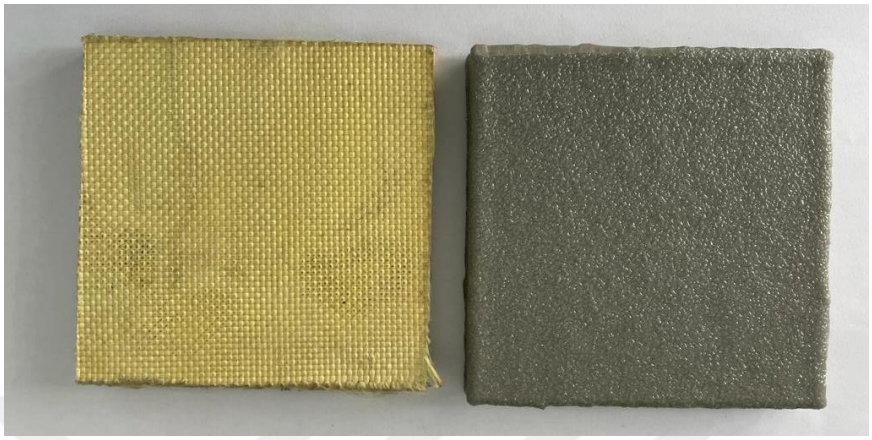
Şekil 2. 3. Poliüre dalga yayılımı

Poliüre bağları, yüksek ivme ile hareket eden merminin hareketi üzerine yüksek elastomerik polimer bağlarının reaksiyonu ile mermiyi durdurur. Yapılan çalışmaları özetlemek gerekirse poliürenin koruma mekanizmasının yukarıda bahsedildiği gibi polimer zincirlerindeki sert seğmenlerin darbe ile yeniden düzenlemesi, kristalizasyonu ve nötralizasyonu şok dalgaları altındaki en önemli enerji dağıtımı mekanizmasıdır. Buna ek olarak poliürelerin düşük-yüksek gerinim hızlarındaki hareketi de viskoelastik davranışa sebep olduğu bu nedenle yine enerji dağılımı mekanizmasında rol oynadığı görülmektedir.[62]

Poliürenin gerinim oranı (strain-rate) duyarlılığı (bağımlılığı), patlama ve darbe direncinde kullanımına katkıda bulunur. Poliüre gerinim duyarlılığı, yani yüksek gerinim hızındaki deformasyon davranışı elastik davranıştan camsı davranışa geçişi oluşturur. Poliürelerin bu davranışı da belirli koşullar altında yüksek miktarda enerji dağıtımını elde etmek için kullanılmalarını sağlamaktadır. Bir diğer deyişle gerinim duyarlılığı malzemenin elastik ve camsı davranışlar arasındaki davranış değişimi ile yakında ilgili olup düşük gerinim hızlarında elastik yüksek gerinim hızlarında ise camsı davranış sergiler. [63,64]

Balistik penetrasyon, yüksek sıcaklık, yüksek basınç ve yüksek gerinim oranına sahip özel bir darbe işlemidir. Polyureanın uygulandığı substratların balistik limitlerini yüksek bir şekilde arttırdığı gözlemlenmiş olup balistik korumada da yine en önemli

mekanizmanın yine malzemenin darbe kaynaklı elastik davranıştan camsı davranışa geçiş olduğu bulunmuştur [64].

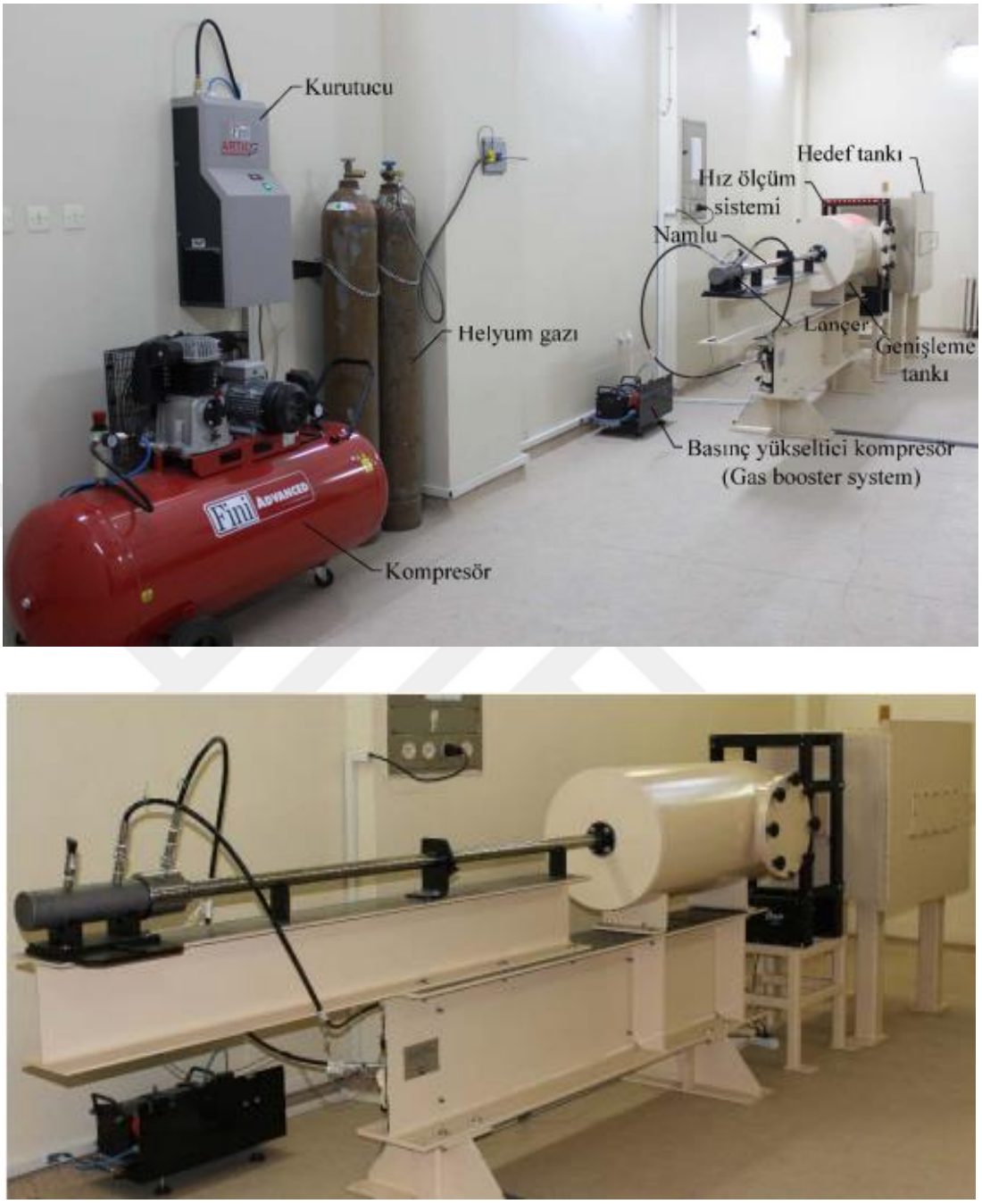


Şekil 2. 4. Aramid ve poliüre kaplı Aramid kompozit levha

2.2. Yöntem

Poliüre kaplı Aramid kompozit plakalarının yüksek hızlı darbe testleri, Erciyes Üniversitesi Makine Mühendisliği bünyesinde bulunan tek kademeli bir gaz silah sistemi ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 2.5). Balistik testlerde, MIL-DTL-46593B [65]'de belirtilen 0.3 kalibreli parçacık benzetimli mermi (Fragment Simulated Projectile) kullanılmıştır. Gaz silah sistemi diyafram ve sabot sistemi ile çalışmaktadır. 0.3 kalibrelik parçacık benzetimli merminin geometrik boyutları Şekil 2.2 'de verilmiştir. Testlerde kullanılan mermiler 4340H çelikten üretilmiştir ve MIL-DTL-46593B uyarınca 30 ± 2 Rockwell C sertlik değerinedir.

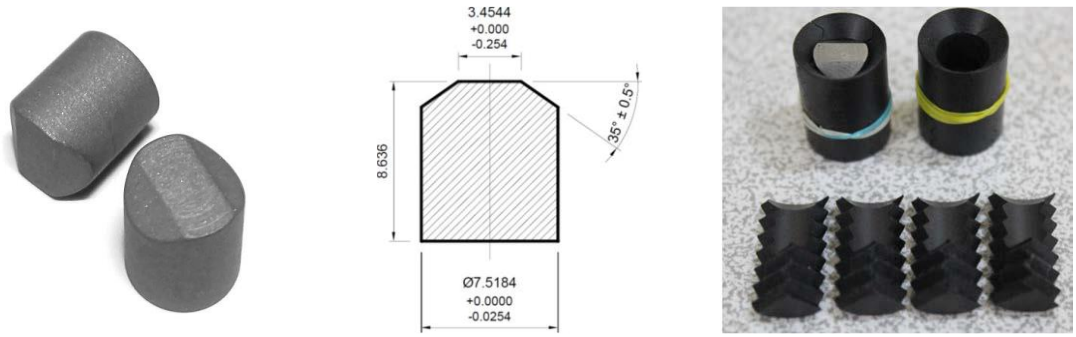
Gazlı silah sistemi lançer, namlu, genişleme tankı, hız ölçüm sistemi ve hedef tankı olmak üzere beş kısımdan oluşmaktadır. Kullanılan sistemdeki lançer iki diyaframın merminin arka yüzeyinde ve iki basınç haznesi arasında kullanıldığı bir tasarımı içermektedir. Gazlı silah sisteminde helyum gazı kullanılmaktadır.



Şekil 2. 5. Balistik test sistemi (gaz silahı)

Tez çalışması kapsamında kullanılan gazlı silah sisteminin namlusu 1.8 m uzunluğunda ve çapı 12.7 mm olup çalışma basıncı en fazla 690 bar'dır. Sistem farklı malzeme özelliklerinde ve çentik derinliğindeki diyaframlar kullanılarak mermi hızı 500 m/s ile 1200 m/s aralığında değişmektedir. Gazlı silah sisteminde, mermi namlu içerisine polimer malzemeden üretilmiş bir sabot içerisinde yerleştirilir. Sabotlar, gazlı silah sisteminde merminin namlu içerisinde yüksek hızlı hareketi sırasında ki yapısal

bütünlüğü sağlayarak merminin hedefe düz bir şekilde gitmesini yardımcı olan elemanlardır (Şekil 2.6). Mermi hızının ayarlanması için farklı basınç değerlerinde deformasyona uğrayan, farklı malzemelerdeki ve farklı çentik derinliğine sahip diyaframlar istenilen hız değerine göre seçilerek lançer sisteminin basınç haznelerinin önüne yerleştirilir. Daha sonra iki basınç haznesinden oluşan lançer sistemi kapatılır. Sonrasında ilk hazne, istenilen hız değerine göre seçilen diyaframın deformasyona uğradığı basınçtan daha düşük bir basınç değerinde helyum gazı ile basınçlandırılır. Daha sonra ikinci hazne de aynı basınç değerindeki gazla doldurulur. En son olarak ilk haznedeki basınç iki katına çıkartılarak ikinci haznedeki gazın ani olarak boşaltılması ile diyafram, çentik derinliğine bağlı olarak deformasyona uğrar ve yüksek basınçlı gaz son haznede bulunan mermiyi harekete geçirir. Üçüncü aşamada, mermi, sabot ile birlikte namlu içerisinde genişleme tankına kadar ilerler. Genişleme tankına gelen mermi ve sabot, ani kesit genişlemesi sonucu oluşan basınç farkından dolayı birbirinden ayrılır. Sabot genişleme tankında kalır ve mermi hedefe doğru yoluna devam eder. Genişleme tankını geçen mermi hız ölçüm sistemine girer ve burada mermi hız ölçümü gerçekleştirilir (Şekil 2.7). Bu sistem, aralarında sabit mesafe bulunan iki lazer ışık perdesi ve bu ışık perdelerinin tam karşısında bulunan fotosellerden oluşmaktadır. Genişleme tankından çıkan mermi, iki ışık perdesi arasındaki sabit mesafeden geçtiği sırada, bu iki ışık perdesinin tam karşısında bulunan fotoseller kapanır ve cihaz merminin sabit mesafeyi aldığı süreyi, fotesellerin kapanma süresi farkından hesaplar. Böylelikle hız ölçüm sistemi, aradaki mesafe ve ölçülen süre yardımıyla mermi hızını hesaplamış olur. Hız ölçümünden sonra, mermi, hedef tankına girer ve hedefe merminin darbesi gerçekleşmiş olur.



Şekil 2. 6. Gaz silahı sisteminde kullanılan sabot ve mermi.

Gaz silah siteminin basınçlandırma ve ateşleme mekanizması, tedarikçi firma tarafından geliştirilen bir yazılım kullanılarak bilgisayar kontrollü bir ünite (Şekil 2.7) tarafından yapılmaktadır.



Şekil 2. 7. (a) Hız ölçüm sistemi, (b) Bilgisayar kontrollü ateşleme ve basınçlandırma mekanizması

Atış testlerinde kullanılan düzenekteki diğer bir parça ise numunelerin monte edildiği Bağlama Aparatıdır. Bu nedenle, poliüre kaplı kompozit numunelere, balistik test sistemine sabitleyebilmek için Şekil 2.8.'te gösterilen bağlama aparatı kullanılmıştır.



Şekil 2. 8. Numune bağlama aparatı

Balistik testler sonrası mermilerin çıkış hızlarının ölçülmesi için Photron marka yüksek hızlı kamera kullanılmıştır. 1.000.000 fps özelliğine sahip yüksek hızlı kamera yazılımı yardımı ile görüntü işleme tekniği ve testler sırasında referans noktalar kullanılarak

mermi çıkış hızları hesaplanmıştır. Yüksek hızlı kamera, yerleşimi yüksek frekanslı led ışıklar ve hız ölçüm referans noktaları şekil 2.9'da gösterilmiştir.



Şekil 2. 9. Balistik testlerde kullanılan yüksek hızlı kamera ve mermi çıkış hızı ölçümü

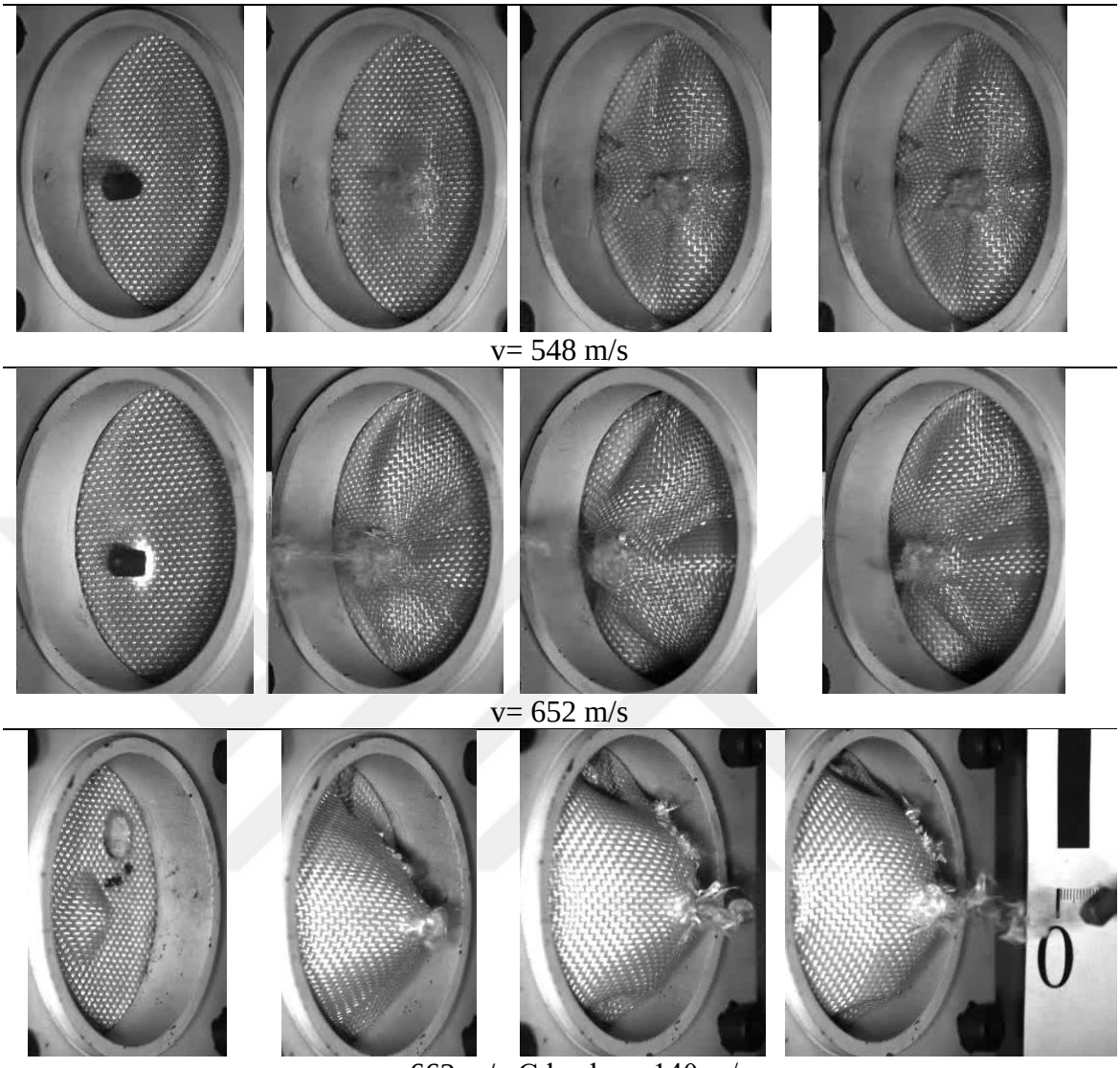
3. BÖLÜM

BULGULAR

Bu tez çalışmasında aramid kompozit levhaların balistik davranışına poliüre kaplama etkisi araştırılmıştır. Balistik testler 550-750 m/s arasında farklı hızlarda gerçekleştirilmiştir. Atışlarda parçacık benzetimli mermi kullanılmıştır. Gaz sıkıştırma prensibine dayanan sistemde 75-125 bar aralığında basınçlandırma kullanılmıştır. Endüstriyel uygulamalara göre seçilmiş iki farklı farklı alansal yoğunlukta ve katman kalınlığında Aramid kompozit levhalar kullanılmıştır. 5 mm kalınlığında poliüre kaplamasının farklı mermi hızları karşısındaki davranışı bilgisayarlı tomografi kullanılarak kesit kesit incelenmiştir. Balistik testler sırasında yüksek hızlı kamera ile mermi giriş ve çıkışları görüntülenmiş olup, mermi çıkış hızları görüntü işleme yardımı ile tespit edilmiştir. Testler sonrası numunelerin fotoğrafları alınarak deformasyon geometrileri incelenmiştir. Balistik testler belirlenen ağırlık oranlarında numunelerin kısmi penetrasyon ve perforasyon durumlarına göre yapılmıştır. Hız belirleme çalışmaları açısından ön denemeler yapılmış ve satabil hızlarda testler en az iki kere tekrarlanmıştır. Yüksek hızlı kamera görüntüleri yaklaşık 60 bin fps kullanılarak alınmıştır. Bilgisayarlı tomografi kullanılarak alınan kesit ve iç yapı görüntülerinde deformasyon ve delaminasyon ölçümleri alınmıştır. 24 katmanlı kompozitler 1. Tip numune olarak, 28 katmanlı numuneler ise 2. Tip olarak isimlendirilmiştir.

3.1. 1. Tip Kaplamasız Kompozit Plakaların Balistik Test Sonuçları

1. Tip (24 katman, 10 mm kalınlık) kompozit levhaların poliüre kaplaması olmadan balistik testlerinde 3 farklı mermi hızı kullanılmıştır. Bu hızlar 548, 652 ve 662 m/s olarak kısmi penetrasyona ve tam perforasyona neden olmuştur. Şekil 3.1'de 1. Tip, 24



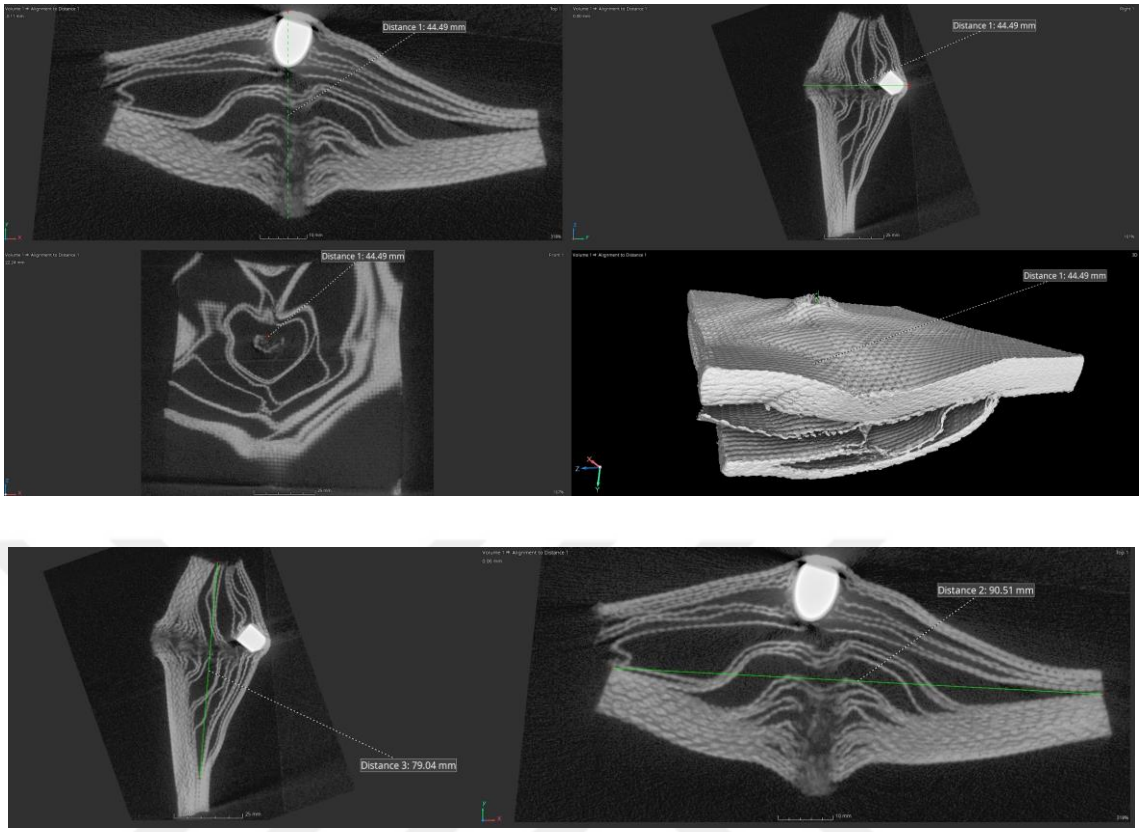
Şekil 3. 1. 24 katmanlı ve poliüre kaplama olmayan aramid kompozit plakaların yüksek hızlı kamera ile balistik test sırasında alınan görüntüleri (v: mermi hızı)

katmanlı, poliüre kaplamasız adamid kompozit plakların yüksek hızlı kamera ile balistik testler sırasında alınmış görüntüleri verilmiştir. Yüksek hızlı görüntüleme malzemenin ön ve arkasından farklı atışlarda yapılmıştır. Bunun nedeni temas anındaki deformasyon geometrisinin daha detaylı tespit edilebilmesi için geçerli olmuştur. 548 ve 652 m/s mermi hızına sahip numunelerde mermi giriş yönünden görüntü alınmıştır. 662 m/s mermi hızı altında ise mermi çıkış yönünden görüntüleme yapılmıştır. 548 ve 652 m/s mermi hızlarında numunelerde perforasyon olmamış kısmi penetrasyon meydana gelmiştir. 662 m/s mermi hızında ise perforasyon meydana gelmiş olup yüksek hızlı kamera yazılımı ile yapılan görüntü işleme sonucunda mermi çıkış hızı 140 m/s olarak



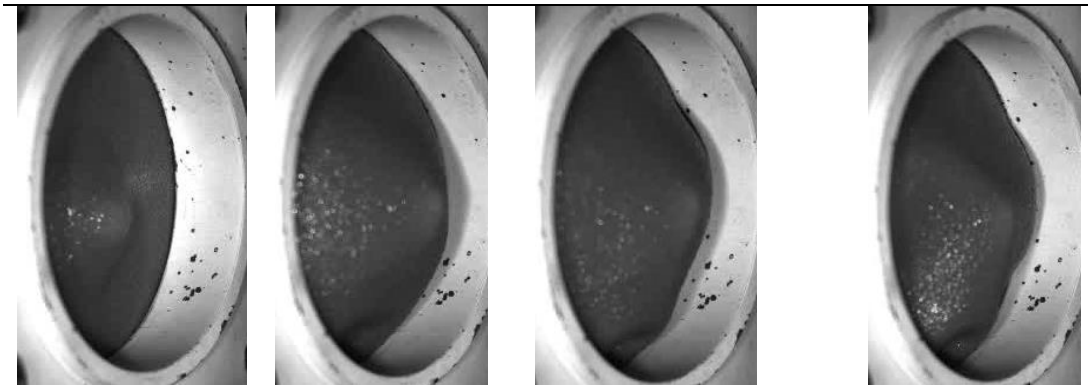
Şekil 3. 2. 24 katmanlı ve poliüre kaplama olmayan kompozit levhaların 548, 652 ve 662 m/s mermi hızları altındaki deformasyon görüntüleri

ölçülmüştür. Özellikle mermi girişinden alınan görüntülerde gerilme dalgasının numune geometrisini oldukça fazla bozduğu ve dalgalanmalara sebep olduğu görülmektedir. Mermi çıkışından alınan görüntülerde ise numunenin mermi ile deforme olduğu ve bu bölgelerde de delaminasyona sebebiyet verdiği görülmektedir. Şekil 3.2'de aynı numunelerin balistik test sonrası mermi giriş ve çıkış yönünden deformasyon görüntüleri verilmiştir. Delaminasyon alanlarının oluşumu için numuneler diğer taraftan görüntülenerek incelenmiştir. Mermi hız artışı ile deformasyon geometrileri farklılık arz

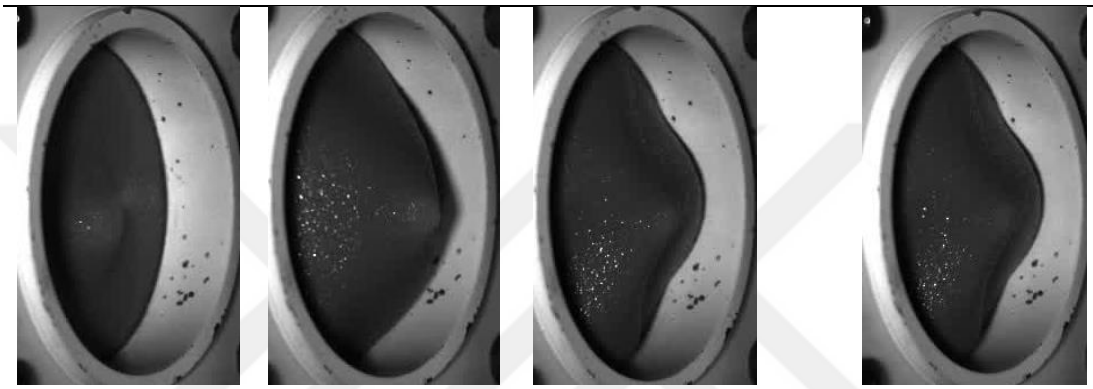


Şekil 3. 3. 24 katmanlı ve poliüre kaplama olmayan kompozit levhanın 652 m/s mermi hızı altındaki kesit görüntüleri

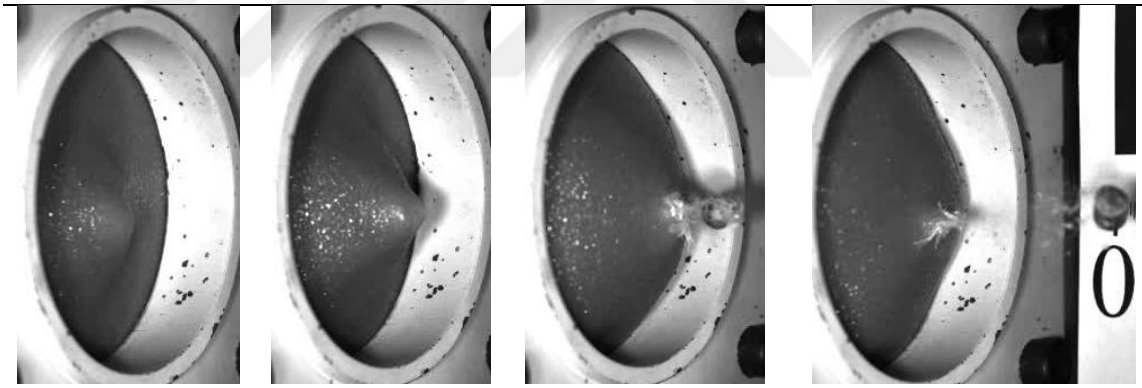
etmektedir ve delaminasyon alanları artmıştır. Ancak bu görüntüler mermi etkisinin araştırılması için yeterli bilgiyi vermemektedir. Şekil 3.3'te 1. Tip (24 katman, 10 mm) kalınlığındaki kaplamasız Aramid kompozitlerin 652 m/s mermi hızı altındaki bilgisayarlı tomografi tarama ve kesit görüntüleri verilmiştir. Taramalar tüm numune üzerinden yapılmış olup bilgisayar destekli bir yazılım ile istenilen kesit anında görüntü üzerinden ölçüm yapılabilmektedir. Farklı numunelerde farklı teknikler izlenmiştir. İlgili numunede ise mermi konumu üzerinde 3 eksen üzerinden görüntüler alınmıştır. Mermi numuneyi tam delmek üzere iken durmuştur ve kısmi penetrasyona sebebiyet vermiştir. Numunenin mermi yönündeki deformasyonu delaminasyon olarak değerlendirilmiş ve 10 mm'lik numune toplamda 44 mm'lik bir deformasyon göstermiştir. Merminin konumu ve gittiği görüntülerde açıktır. Mermi ilerlemesi sırasında katmanlar ayrılarak delaminasyon 3 eksende de meydana gelmiştir. En büyük delaminasyon miktarları 79 ve 90 mm olarak ölçülmüştür. Tabaka ayrılmalarının özellikle son katmanlara doğru arttığı görülmektedir. Bu durum numunenin perfore



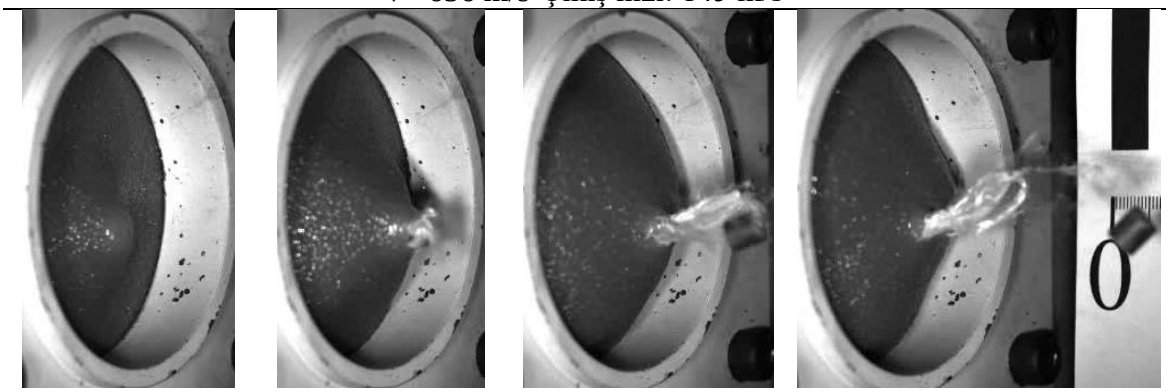
v= 621 m/s



v= 645 m/s

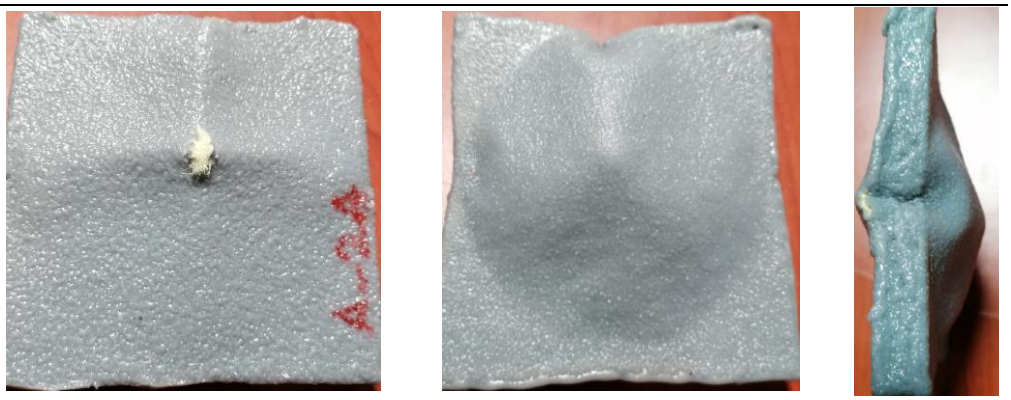


v= 656 m/s-Çıkış hızı: 145 m/s

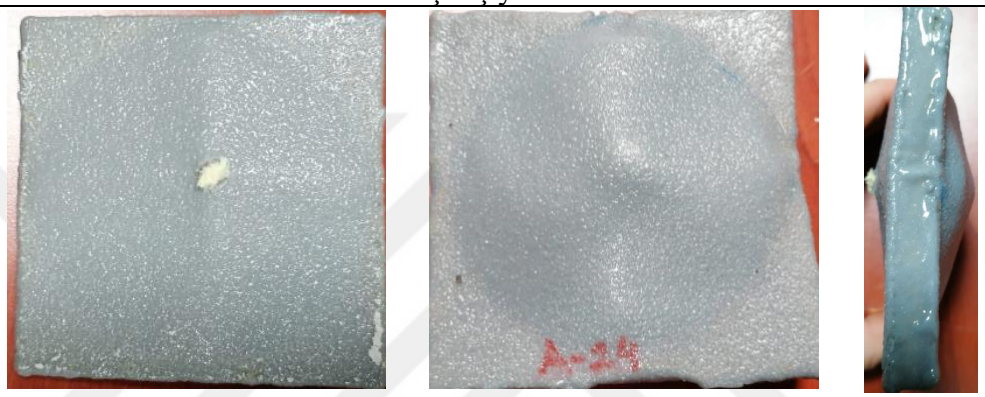


v= 675 m/s-Çıkış hızı: 180 m/s

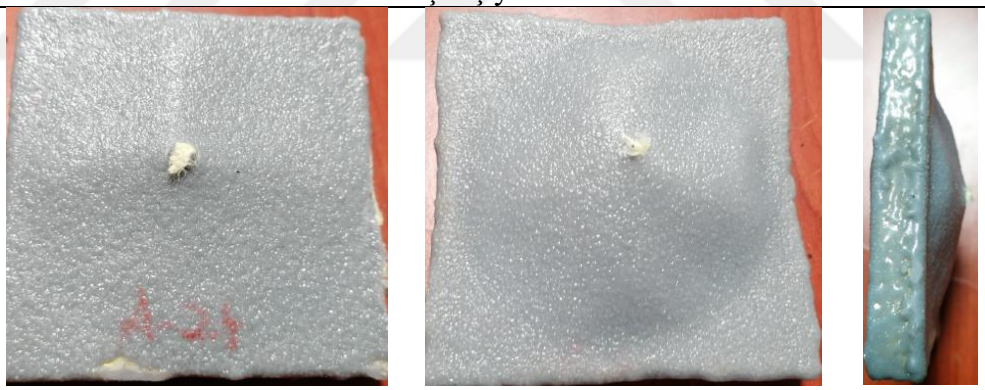
Şekil 3. 4. 24 katmanlı ve poliüre kaplı aramid kompozit plakaların yüksek hızlı kamera ile balistik test sırasında alınan görüntüleri (v: mermi hızı)



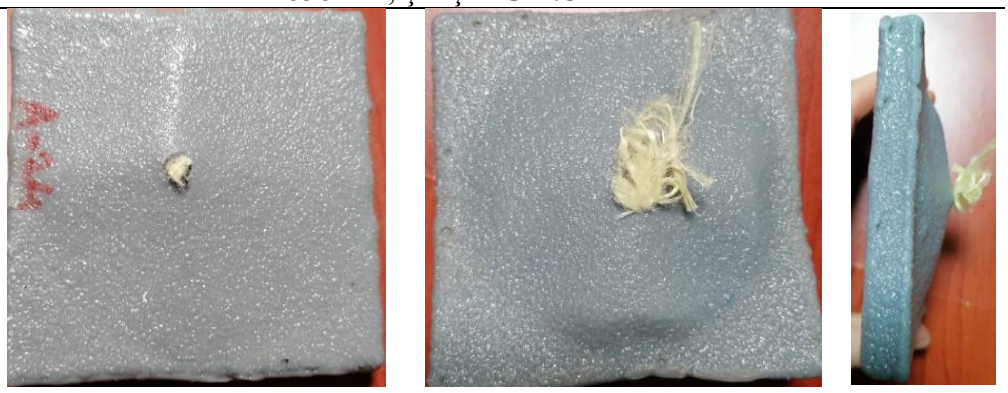
v= 621 m/s-çıkış yok



v=645 m/s-çıkış yok

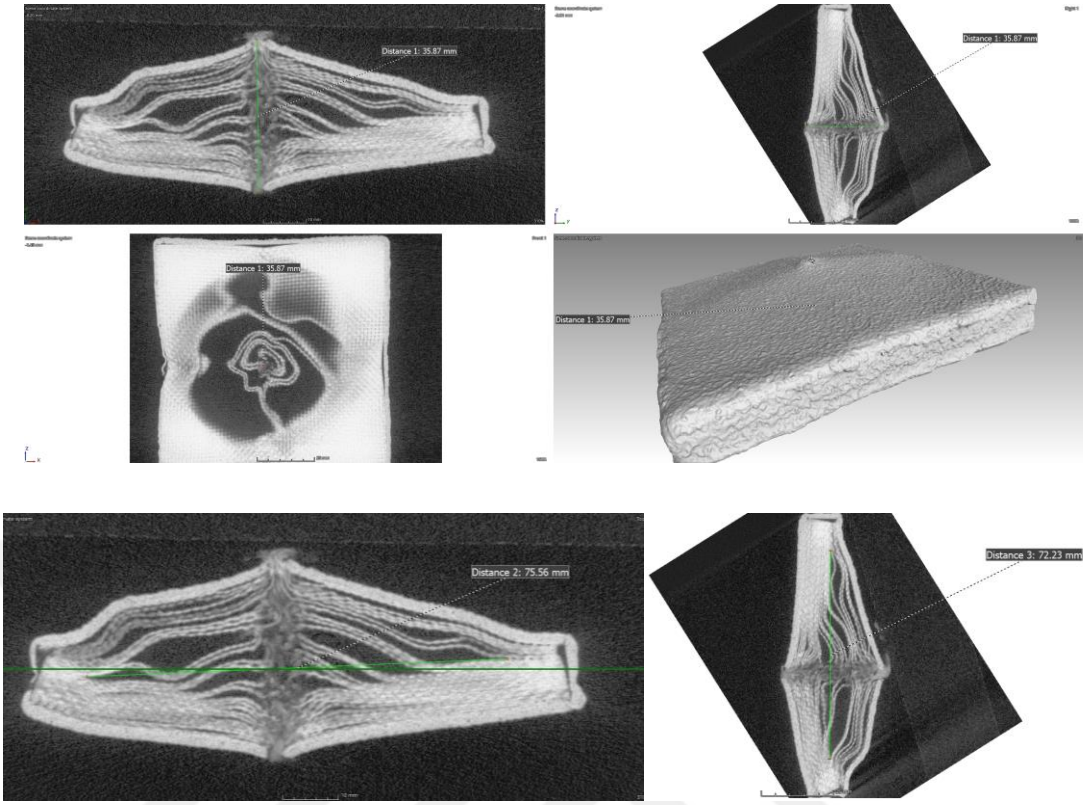


v= 656 m/s, çıkış-145 m/s



v= 675 m/s, çıkış-180 m/s

Şekil 3. 5. 24 katmanlı ve poliüre kaplı kompozit levhaların 645, 656 ve 675 m/s mermi hızları altındaki deformasyon görüntüleri

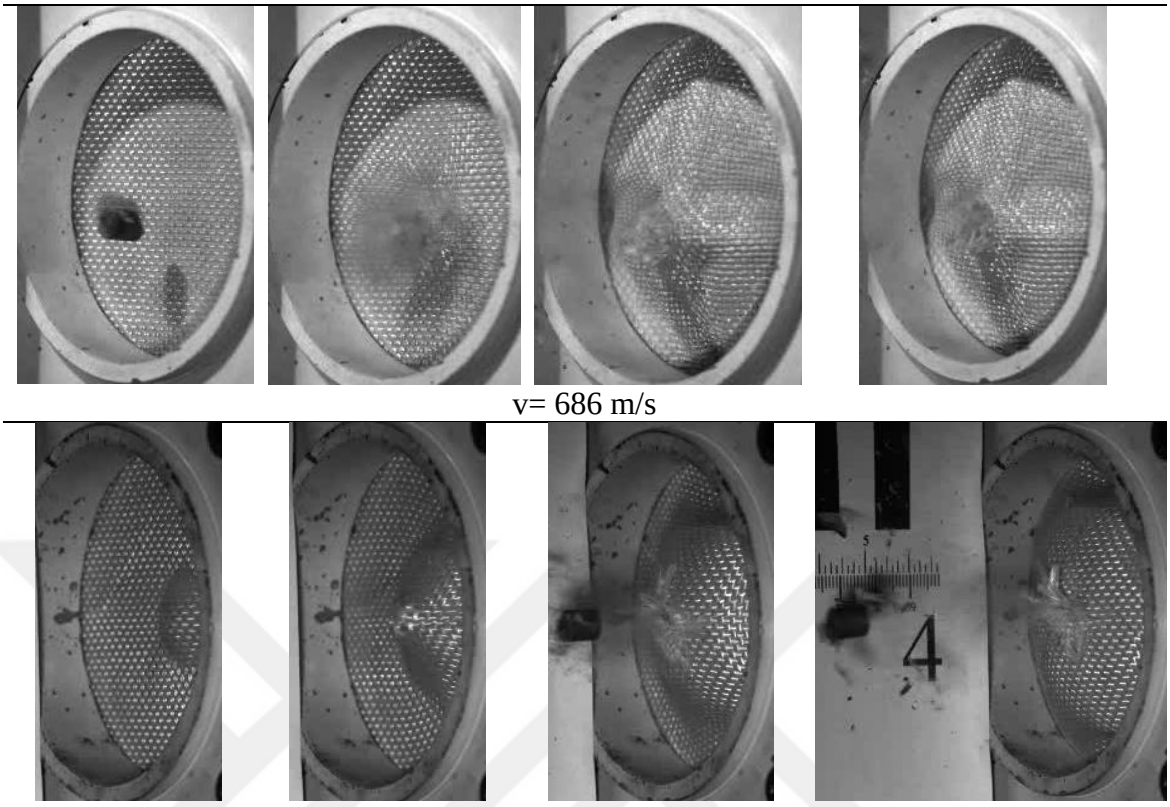


Şekil 3. 6. 24 katmanlı ve poliüre kaplı kompozit levhanın 675 m/s mermi hızı altındaki kesit görüntüleri

olamadığı için mermi enerjisinin tabakalar arası ayrılmayla absorbe edildiği için oluşmaktadır.

3.2. 1. Tip Poliüre Kaplamalı Kompozit Plakaların Balistik Test Sonuçları

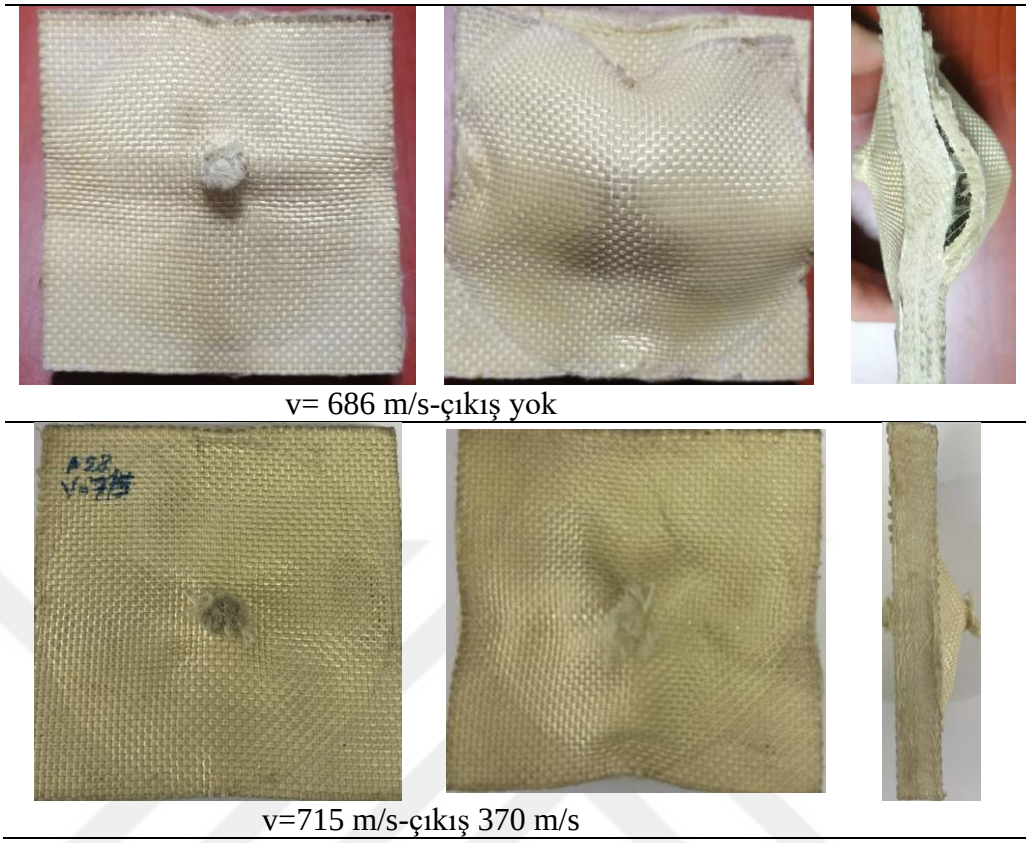
Şekil 3.4'te 1. Tip (24 katman, 15 mm kalınlığındaki) poliüre kaplı kompozit numunelerin balistik testler sırasındaki yüksek hızlı kamera görüntüleri verilmiştir. 621, 645,656 ve 675 m/s mermi hızlarında 4 farklı atış yapılmıştır. Yapılan ön testlerde mermi giriş yönünde deformasyon değişimi oldukça az görülmüş ve mermi çıkış yönünde yüksek hızlı kamera ile çekimler yapılmıştır. 621 ve 645 m/s mermi hızında delinme olmamıştır. 656 ve 675 m/s mermi hızlarında delinme olmuştur. Mermi çıkış hızları sırası ile 145 ve 180 m/s olarak ölçülmüştür. Bu sonuçlar açısından poliüre kaplamasının numunenin perforasyon kabiliyetine anlamlı bir etkisi olmamıştır. Ancak deformasyon geometrisinin korunması açısından oldukça kabiliyetlidir. Şok gerilme dalgaları absorbe etme kabiliyeti mermi ilerlemesinde alınan görüntüler ile açıktır. Mermi giriş ve çıkış hızları arasındaki fark çıkış hızında daha fazladır. Kompozit



Şekil 3. 7. 28 katmanlı ve poliüre kaplama olmayan aramid kompozit plakaların yüksek hızlı kamera ile balistik test sırasında alınan görüntüleri (v: mermi hızı)

malzemenin perfore olma kabiliyeti ve mermi enerjisini sönümleme kabiliyeti mermi hızı arttıkça ters orantılı olarak değişmektedir.

Şekil 3.5'te 1. Tip poliüre kaplı numunelerin balistik testler sonucu mermi giriş ve çıkış yönündeki deformasyon geometrileri verilmiştir. Mermi giriş geometrilerinde kalıcı deformasyon miktarları oldukça sınırlıdır. Mermi çapı kadar poliürede delinme vardır. Herhangi bir çatlak oluşumu veya yırtılma söz konusu değildir. Perforasyon olmayan ve mermi hızı düşük numunede delaminasyon daha fazla görülmektedir. Mermi hızı artışı fiberlerde hasar meydana getirdiği için delaminasyonu azaltmaktadır. Benzer durum perfore olan numunelerde de görülmektedir. 656 m/s mermi çıkış hızına sahip numunede mermi çıkış yönünde poliüre delinmesi görülmeyecek kadar küçüktür. Poliürenin güzel bir özelliğini sergileyen bu numunede, tekrarlı atışlarda oluşabilecek hasarları azaltması beklenmektedir. Şekil 3.6'da ise ilgili testlerden 675 m/s mermi hızına sahip numunenin bilgisayarlı tomografi, X-Ray tarama görüntüleri verilmiştir. Kesit görüntülerinde poliüre kaplama katmanı oldukça açıktır. Yapılan ölümlerde 35 mm mermi yönünde deformasyon ve delaminasyon ölçülmüştür. Diğer yönlerdeki

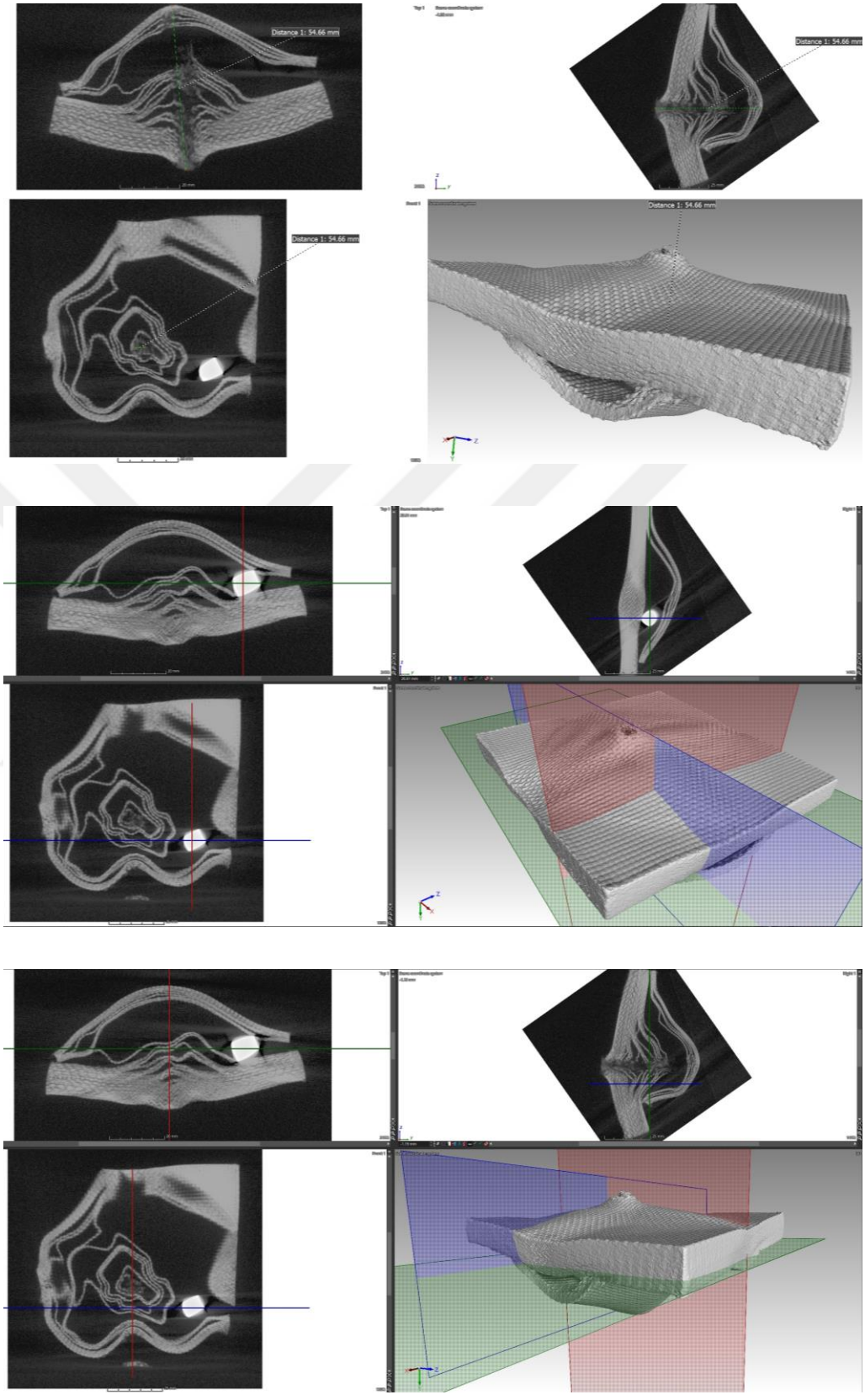


Şekil 3. 8. 24 katmanlı ve poliüre kaplama olmayan kompozit levhaların 686 ve 715 m/s mermi hızları altındaki deformasyon görüntüleri

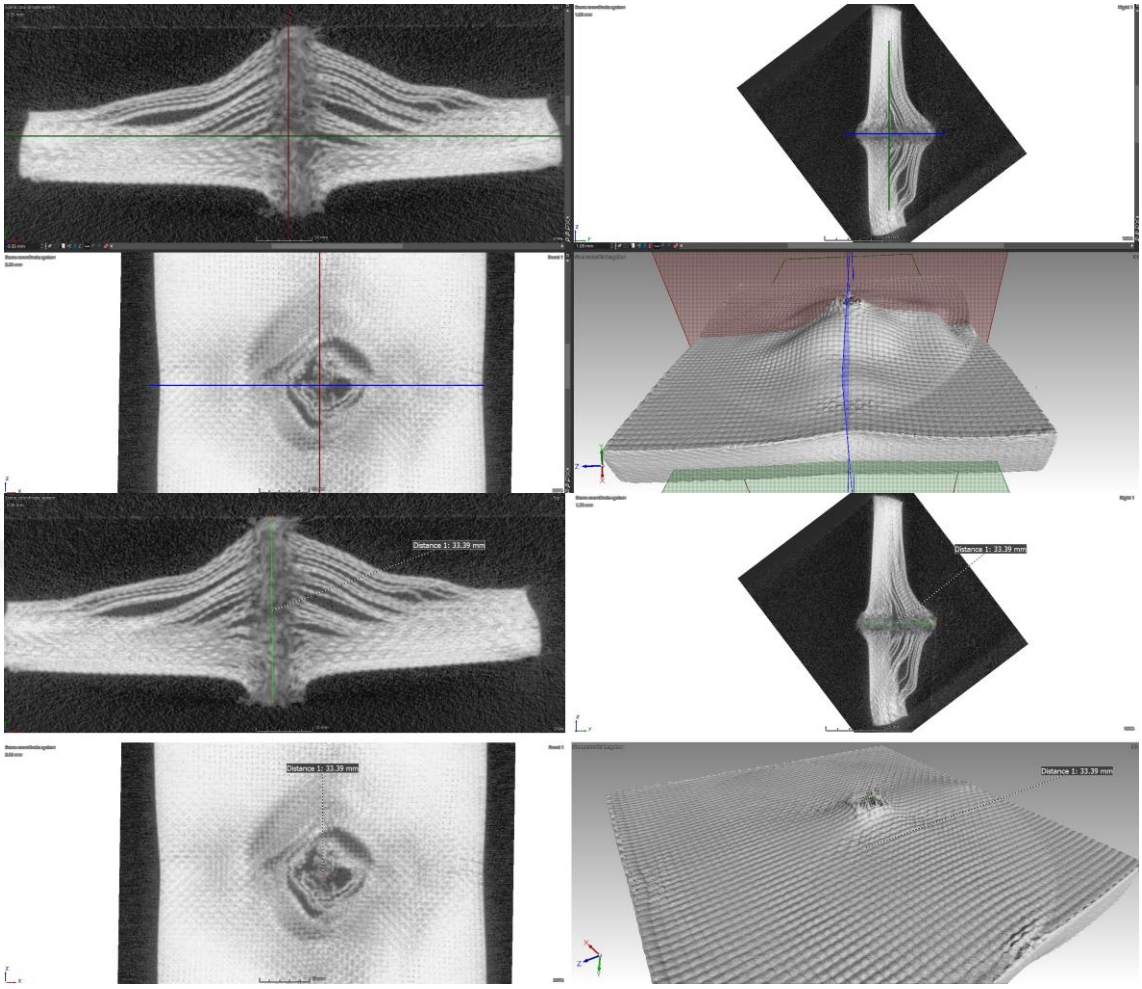
delaminasyon mesafeleri ise 75 ve 72 mm olarak ölçülmüştür. Mermi giriş ve çıkış kesitleri daha detaylı incelendiğinde hasar gören fiberlerin mermi yolunu kapatacak şekilde konumlandığı görülmektedir. Mermi çıkışına doğru fiberlerin katman katman ayrıldığı görülmektedir. Bu sayede mermi enerjisi sönümlenmektedir. Sınır şartından dolayı kaplamasız numunelerde meydana gelen delaminasyonların poliüre ile önlendiği görülmektedir.

3.3. 2. Tip Kaplamasız Kompozit Plakaların Balistik Test Sonuçları

Şekil 3.7'de 2. Tip (28 katman, 11.6 mm kalınlık) poliüre kaplama olmayan Aramid kompozit levhaların balistik test sırasında alınan yüksek hızlı kamera görüntüleri verilmiştir. 686 ve 715 m/s mermi hızı olmak üzere iki farklı mermi hızında balistik test gerçekleştirilmiştir. 686 m/s mermi hızına sahip numunede çıkış olmazken görüntüleme mermi giriş yönünde yapılmıştır. 715 m/s mermi giriş hızına sahip numunede ise görüntüleme mermi çıkış yönünde yapılmış olup mermi çıkış hızı 370 m/s olarak



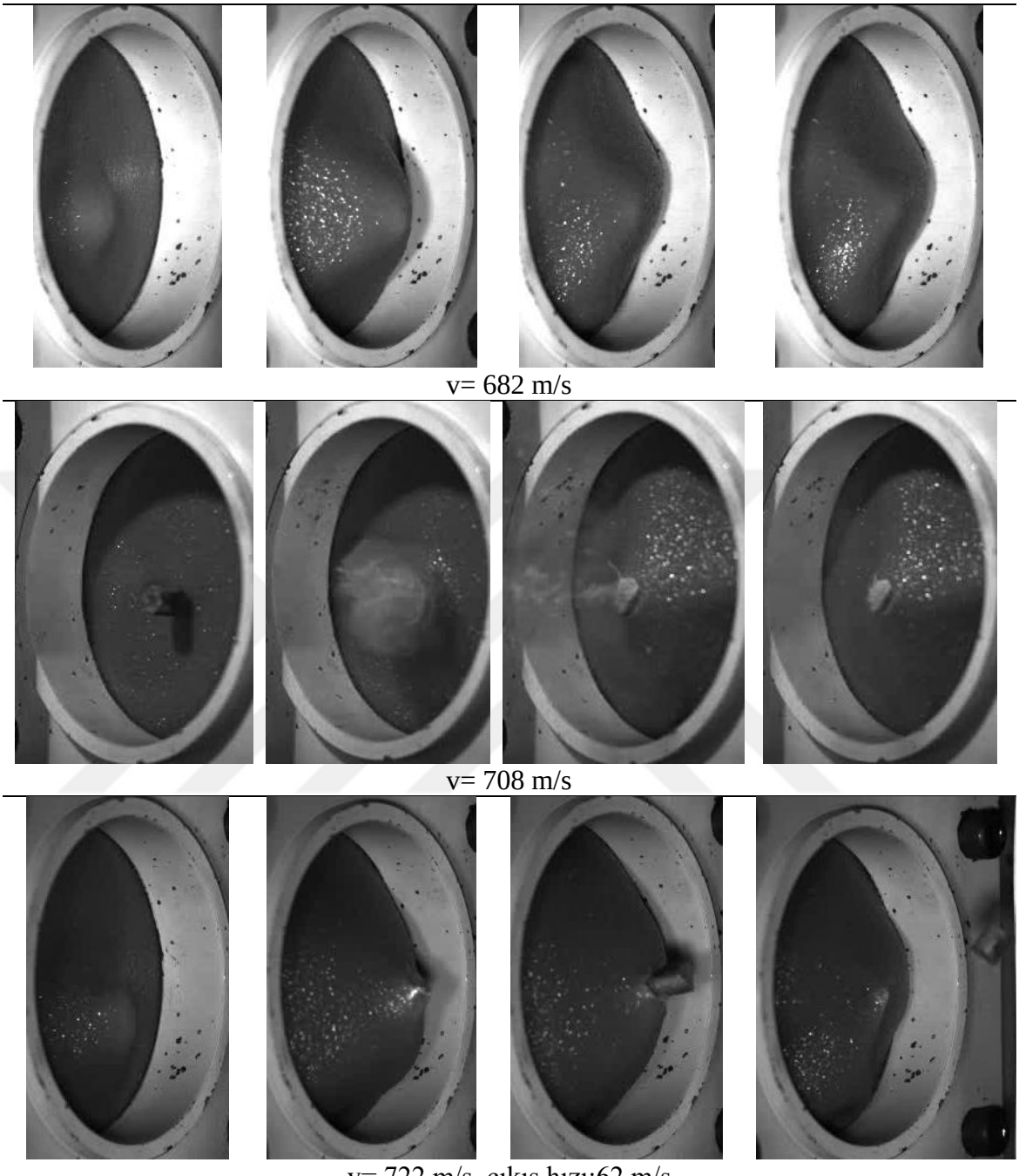
Şekil 3. 9. 28 katmanlı ve poliüre kaplama olmayan kompozit levhanın 686 m/s mermi hızı altındaki kesit görüntüleri



Şekil 3. 10. 28 katmanlı ve poliüre kaplama olmayan kompozit levhanın 715 m/s mermi hızı altındaki kesit görüntüleri

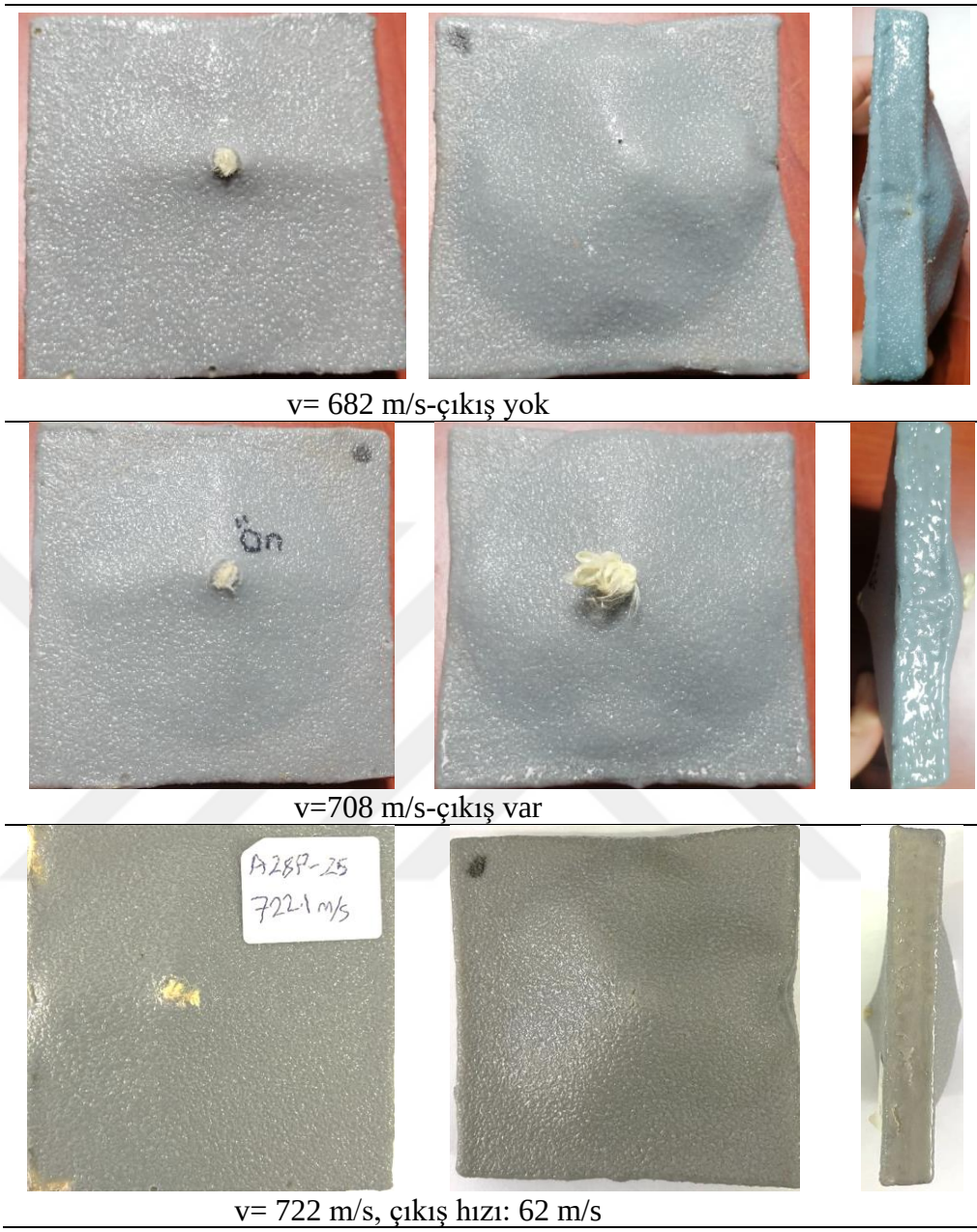
ölçülmüştür. Yüksek hızlı yapılan atışta deformasyon geometrisinin korunduğu gözlemlenmiştir.

Şekil 3.8'de ise ilgili numunelerin balistik test sonucu deformasyon ve delaminasyon görüntüleri verilmiştir. Mermi giriş ve çıkış yönünde alınan görüntülerde 686 m/s mermi hızı altındaki numunede oldukça fazla tabakalar arası ayrılma olduğu gözlemlenmiştir. 24 katmanlı 1. Tip kaplamasız numunede 662 m/s mermi hızı altında perforasyon görünürken sadece 4 katman artırımı ile 686 m/s mermi çıkışı görülmemiştir. Mermi ilerlemesinin yerinin ve eksenlere göre delaminasyon miktarlarının ölçülmesi için bilgisayar destekli tomografi, X-Ray tarama kullanılmıştır. Şekil 3.9'da ilgili numunenin 686 m/s mermi hızı altındaki tarama ve kesit görüntüleri verilmiştir. Mermi numune içerisine girdikten sonra merkezden sapmış ve farklı yönde,



Şekil 3. 11. 28 katmanlı ve poliüre kaplı aramid kompozit plakaların yüksek hızlı kamera ile balistik test sırasında alınan görüntüleri (v: mermi hızı)

kenara doğru ilerlemiştir. Bu açıdan malzemenin kesit görüntüleri hem mermi giriş ekseni doğrultusunda hem de merminin durduğu konumdaki eksenlerden alınmıştır. Mermi ekseni boyunca deformasyon ve delaminasyon miktarı 54 mm olarak ölçülmüştür. Merminin kenar tarafa doğru ilerlemesi ile tabalar arası açılma daha belirgin hale gelmiştir. Mermi konumundaki kesit görüntüleri incelendiğinde ise merminin hasara uğrattığı fiberlerin doğrultularında delaminasyon oldukça az olurken



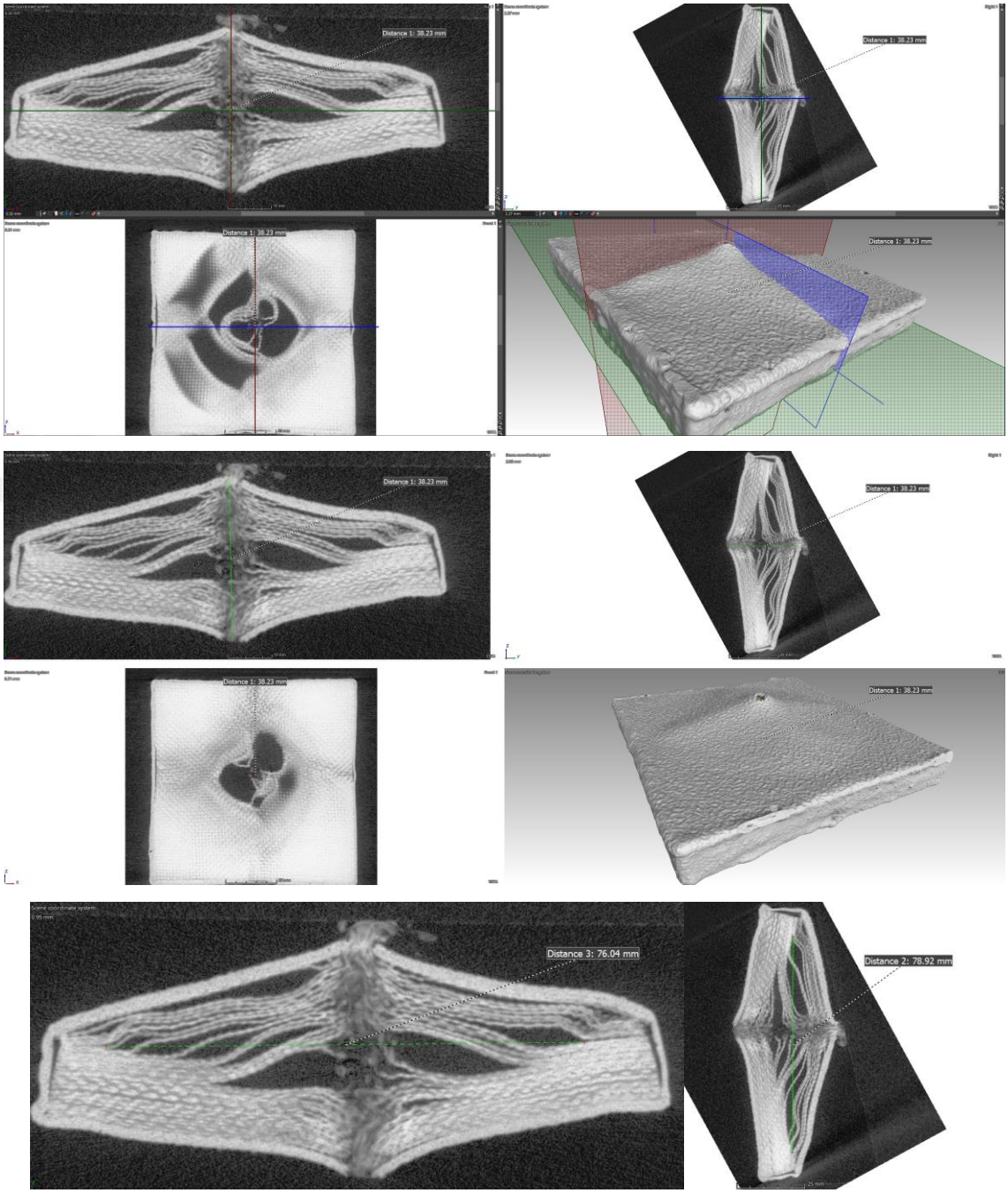
v= 682 m/s-çıkış yok

v=708 m/s-çıkış var

v= 722 m/s, çıkış hızı: 62 m/s

Şekil 3. 12. 28 katmanlı ve poliüre kaplı kompozit levhaların 682, 708 ve 722 m/s mermi hızları altındaki deformasyon görüntüleri

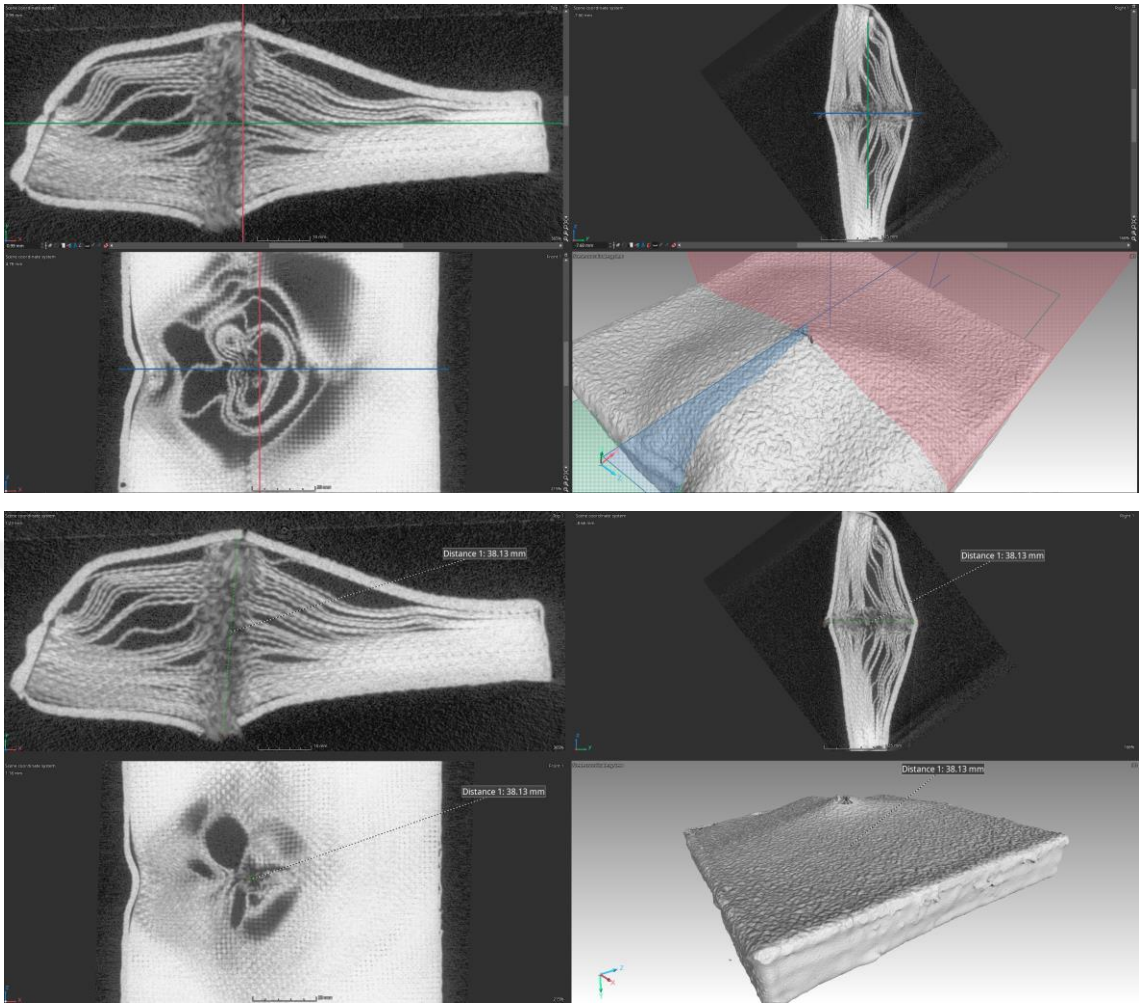
perfore edemediği fiberlerden itibaren açılma meydana gelmiştir. Şekil 3.10'da ise 715 m/s mermi hızı altındaki X-Ray tarama görüntüleri verilmiştir. Mermi yönündeki delaminasyon ve deformasyon miktarı 33 mm olarak ölçülmüştür. Mermi hızı arttıkça deformasyon azalmıştır. Delaminasyon alanlarında ise anlamlı bir azalma vardır. Mermi numune içerisinde yön değiştirmemiş ve giriş ekseni boyunca numune perfore olmuştur.



Şekil 3. 13. 28 katmanlı ve poliüre kaplı kompozit levhanın 708 m/s mermi hızı altındaki kesit görüntüleri

3.4. 2. Tip Poliüre Kaplı Kompozit Plakaların Balistik Test Sonuçları

Şekil 3.11'de 2 Tip (28 Katman ve 16.6 mm kalınlık) poliüre kaplı Aramid kompozit levhaların balistik test sırasındaki yüksek hızlı kamera görüntüleri verilmiştir. 682, 708 ve 722 m/s olmak üzere 3 farklı mermi hızında balistik testler yapılmıştır. 682 m/s mermi hızı altındaki numune mermi çıkış yönünden görüntülenmiştir. Poliüre



Şekil 3. 14. 28 katmanlı ve poliüre kaplı kompozit levhanın 722 m/s mermi hızı altındaki kesit görüntüleri

kaplamasının deformasyon geometrisini koruduğu görülmüştür. Numune perfore olmamış ve mermi çıkışı gözlemlenmemiştir. 708 m/s mermi hızı altında numune mermi giriş yönünde görüntülenmiştir. Mermi giriş esnasında fiber kırpıklarının mermi yolunda çıktığı gözlemlenmiş olup hasara uğrayan fiberlerin çıkışı olmuştur. Numunede mermi çıkışı olmamıştır. 722 m/s mermi hızı altında, numune mermi çıkış yönünde görüntülenmiştir. Mermi çıkışı olmuştur ve 62 m/s olarak ölçülmüştür. Mermi çıkış hızı oldukça düşük olarak ölçülmüştür. Kaplamasız numunede 715 m/s altında çıkış hızı 370 m/s olarak ölçülmüştü. Bu açıdan sonuçlar irdelendiğinde çıkış hızının poliüre kaplaması ile oldukça düşürüldüğü görülmüştür.

Şekil 3.12'de 28 katmanlı ve poliüre kaplı kompozit levhaların 682, 708 ve 722 m/s mermi hızları altındaki deformasyon görüntüleri verilmiştir. Mermi giriş yönünde

mermi çapı kadar poliüre kaplamasında açılma olmuştur. Poliüre kaplamasının deformasyon geometrisini korumada başarılı olduğu görülmektedir. Mermi hızı artışı ile mermi yönünde deformasyon miktarında azalma görülmüştür. Mermi çıkış hızı 62 m/s olan numunede poliüre kaplamasında mermi çıkış yönünde açılma gözükmemektedir. Poliüre kaplamasının kabiliyeti görülmektedir. Şekil 3.13'de 2. Tip (28 katmanlı) numunelerin 708 m/s mermi hızı altındaki kesit görüntüleri verilmiştir. Mermi yönündeki deformasyon 38 mm olarak ölçülmüştür. Diğer yönlerdeki delaminasyon miktarları 76 ve 78 mm olarak ölçülmüştür. Poliüre kaplamasının numunenin perforasyon direncine katkısı anlamlı ölçüde olmamıştır. Ancak delaminasyon alanları ve deformasyon geometrisinin korunması açısından önemli katkıları olmuştur. 722 m/s mermi hızına sahip numunenin X-Ray tarama görüntüleri ise Şekil 3.14'de verilmiştir. Alınan kesitlerin eksenlerinin de verildiği şekil görsellerinde mermi yönündeki deformasyon miktarı 38 mm olarak ölçülmüştür.

Yapılan testler sonucunda, numunelerin mermi enerjisini absorbe etmede başarılı olması: fiber dayanımı ve katmanlar arasının ayrılmaların oluşumu olarak gözlemlenmiştir. Poliüre kaplaması ile numunelerin mermi karşısında delaminasyon yetenekleri azalmıştır. Bu açıdan perforasyon direnci artmamıştır. Ancak gelen ani şok dalgalarının sönümlenmesi açısından oldukça başarılıdır.

4. BÖLÜM

TARTIŞMA-SONUÇ ve ÖNERİLER

Poliüre kaplı Aramid kompozit levhaların balistik performansının araştırılması başlıklı tez çalışmasında tek kademeli gaz silah sistemi kullanılarak parçacık simule mermiler ile balistik testler gerçekleştirilmiştir. Farklı gaz basınçlarda farklı hızlarda yapılan testlerde temel motivasyon numunelerin perforasyon direncinin tespit edilmesi üzerinedir. Çalışmalarda kullanılan poliüre özel bir firma tarafından geliştirilmiş balistik amaçlı yüksek şok dalgalarına karşı yüksek dayanım gösteren polimerik bir malzemedir. Yüksek basınç ve şok dalgaları yayınım halinde malzeme ile temas ettiği için poliüre kaplamasının etkisi anlamlı bir şekilde görülmektedir. Ancak bu tez çalışmasında noktasal temas ile poliüre kaplamasının etkisi araştırılmıştır. Çalışmada endüstriyel zırhlamalarda kullanılan ve parçacık kalkanı uygulamalarında kullanılan iki farklı alansal yoğunluğa sahip Aramid kompozit levha kullanılmıştır. Poliüre kaplamasız olan numunelerin alansal yoğunlukları 10.6 ve 12.4 kg/m^2'dir ve katman sayılar 24 ve 28 olurken kalınlıkları 10 ve 11.6 m olarak kullanılmıştır. Poliüre kalınlığı toplamda 5 mm olarak uygulanmıştır. Alansal yoğunluklar ise 16.4 ve 18.2 kg/m^2'ye yükselmiştir. Balistik testler için tercih edilen mermi hızları 550-750 m/s arasında değişiklik gösterirken mermi giriş hızları lazer sistemi ile tespit edilmiştir. Mermi çıkış hızarı ise yüksek hızlı kamera kullanılarak görüntü işleme yöntemi ile tespit edilmiştir. Balistik testler sonrası yüksek hızlı kamera ile mermi giriş ve çıkış yönünde çekimler yapılmıştır ve mermi ilerleyişi görüntülenmiştir. Delaminasyon alanlarının tespiti ve kesit deformasyonlarını incelemek için numunelere bilgisayarlı tomografi yapılmış olup ölçümler yapılarak sonuçlar irdelenmiştir. Bu sayede poliüre kaplamasının farklı mermi

hızlarında ve farklı kalınlıklardaki etkileri detaylıca araştırılmıştır. Bu kapsamda tercih edilen uygulamalardaki kullanımların balistik performansa etkiler ortaya konulmuştur.

4.1. Sonuç ve Öneriler

Bu tez çalışmasında aramid kompozit levhaların balistik davranışına poliüre kaplama etkisi araştırılmıştır. Gaz sıkıştırma prensibine dayanan sistemde 75-125 bar aralığında basınçlandırma kullanılmıştır. 24 katmanlı kompozitler 1. Tip numune olarak, 28 katmanlı numuneler ise 2. Tip olarak isimlendirilmiştir.

1. Tip (24 katman, 10 mm kalınlık) kompozit levhaların poliüre kaplaması olmadan balistik testlerinde 3 farklı mermi hızı kullanılmıştır. Bu hızlar 548, 652 ve 662 m/s olarak kısmi penetrasyona ve tam perforasyona neden olmuştur. 548 ve 652 m/s mermi hızlarında numunelerde perforasyon olmamış kısmi penetrasyon meydana gelmiştir. 662 m/s mermi hızında ise perforasyon meydana gelmiş olup yüksek hızlı kamera yazılımı ile yapılan görüntü işleme sonucunda mermi çıkış hızı 140 m/s olarak ölçülmüştür. Mermi çıkışından alınan görüntülerde numunenin mermi ile deforme olduğu ve bu bölgelerde de delaminasyona sebebiyet verdiği anlaşılmaktadır. Mermi hız artışı ile delaminasyon alanları artmıştır. 652 m/s mermi hızı için X-Ray tarama görüntülerinde Mermi numuneyi tam delmek üzere iken durmuştur ve kısmi penetrasyona sebebiyet vermiştir ve toplamda 44 mm'lik bir deformasyon göstermiştir. 675 m/s mermi hızına sahip numunenin bilgisayarlı tomografi ile yapılan ölümlerde 35 mm mermi yönünde deformasyon ve delaminasyon ölçülmüştür.

1. Tip poliüre kaplı kompozit numunelere 621, 645,656 ve 675 m/s mermi hızlarında 4 farklı atış yapılmıştır. 621 ve 645 m/s mermi hızında delinme olmamıştır. 656 ve 675 m/s mermi hızlarında delinme olmuştur. Mermi çıkış hızları sırası ile 145 ve 180 m/s olarak ölçülmüştür. Bu sonuçlar açısından poliüre kaplamasının numunenin perforasyon kabiliyetine anlamlı bir etkisi olmamıştır. Ancak deformasyon geometrisinin korunması açısından oldukça kabiliyetlidir. Şok gerilme dalgaları absorbe etme kabiliyeti mermi ilerlemesinde alınan görüntüler ile açıktır. Mermi giriş ve çıkış hızları arasındaki fark çıkış hızında daha fazladır.

2. Tip poliüre kaplama olmayan Aramid kompozit levhalara 686 ve 715 m/s mermi hızı olmak üzere iki farklı mermi hızında balistik test gerçekleştirilmiştir. 686 m/s mermi hızına sahip numunede çıkış olmazken 715 m/s mermi giriş hızına sahip numunede mermi çıkış hızı 370 m/s olarak ölçülmüştür. 686 m/s mermi hızı altında mermi ekseni boyunca deformasyon ve delaminasyon miktarı 54 mm olarak ölçülmüştür. 715 m/s mermi hızı altında ise 33 mm olarak ölçülmüştür. 2 Tip poliüre kaplı aramid kompozit levhaların balistik testleri 682, 708 ve 722 m/s mermi hızlarında gerçekleştirilmiştir. 682 m/s için numune perfore olmamış ve mermi çıkışı gözlemlenmemiştir. 708 m/s mermi hızı altında numunede mermi olmamıştır. 722 m/s mermi hızı altında mermi çıkışı olmuştur ve 62 m/s olarak çıkış hızı ölçülmüştür. Kaplamasız numunede 715 m/s altında çıkış hızı 370 m/s olarak ölçülmüştü. Bu açıdan sonuçlar irdelendiğinde çıkış hızının poliüre kaplaması ile oldukça düşürüldüğü görülmüştür. 2. Tip numunelerin 708 m/s mermi hızı altındaki kesit görüntülerinde mermi yönündeki deformasyon 38 mm olarak ölçülmüştür. 722 m/s mermi hızına sahip numunenin X-Ray tarama görüntülerinde ise mermi yönündeki deformasyon miktarı 38 mm olarak ölçülmüştür.

Yapılan testler sonucunda, numunelerin mermi enerjisini absorbe etmede başarılı olması, fiber dayanımı ve katmanlar arasının ayrılmaların oluşumu olarak gözlemlenmiştir. Poliüre kaplaması ile numunelerin mermi karşısında delaminasyon yetenekleri azalmıştır. Bu açıdan perforasyon direnci artmamıştır. Ancak gelen ani şok dalgalarının sönümlenmesi açısından oldukça başarılıdır.

KAYNAKÇA

1. Eryıldız, E., Eker, A. A. (2015). Savunma Sanayinde Kullanılan İleri Kompozit Malzemeler Ve Uygulama Alanları. **International Journal Of Engineering Research And Development**, 7(4), 8-12.
2. Ersoy, M. S. (2005). Lif Takviyeli Polimerik Kompozit Malzeme Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
3. Youssef, G,.(2010). A Dissertation Submitted İn Partial Satisfaction Of The Requirements For The Degree Doctor Of Philosophy İn Mechanical Engineering, Doctoral Thesis, Unıversıty Of California, Los Angeles
4. Advanced Composite Cluster (Kompozit Malzemelerin Tanımı Ve Gelişimi). (Https://Accluster.Com/Blog-Post.Html?Kategori=Kurumsal&Slug=Kompozit-Malzemelerin-Tanimi-Ve-Gelisimi), (Erişim Tarihi: Şubat 2023).
5. Rosato, D. V. (1997). Designing With Reinforced Composites: Hanser Gardner .
6. Onat A.(2015). Kompozit Malzemeler Ders Notu, Sakarya Üniversitesi, Sakarya.
7. Kaya, A. İ. (2015). Atık Kâğıtlardan Geri Kazanılmış Liflerden Kompozit Malzeme Üretim Olanaklarının Araştırılması. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Isparta.
8. Kaya, A. İ. (2016). Kompozit Malzemeler Ve Özellikleri. **Putech & Composite Poliüretan ve Kompozit Sanayi Dergisi**, 29, 38-45.
9. Tsai, S. W., & Hahn, H. T. (2018). Introduction To Composite Materials. Routledge.
10. Kaw, A. K. (2005). Mechanics Of Composite Materials. CRC Press.
11. Çalışkan, U. (2018) Kompozit Sandviç Kirişlerin Eğilme Darbe Davranışının İncelenmesi. Erciyes Universitesi, Doktora Tezi, Kayseri
12. Seydibeyoğlu, M. Ö. (2012). A Novel Partially Biobased PAN-Lignin Blend As A Potential Carbon Fiber Precursor. **Journal of Biomedicine and Biotechnology**, 2012
13. Vasiliev, V. V., & Morozov, E. V. (2001). **Mechanics and Analysis of Composite Materials**. Elsevier.

14. Itoh, M., Inoue, K., Hirayama, N., Sugimoto, M., & Seguchi, T. (2002). Fiber Reinforced Plastics Using A New Heat-Resistant Silicon Based Polymer. **Journal Of Materials Science**, 37, 3795-3801..
15. Kılıç, E. (2006). Kompozit Malzemeden Yapılan Yaprak Yayların Analizi (Doctoral Dissertation, DEÜ Fen Bilimleri Enstitüsü).
16. (Https://Www.Voltimum.Com.Tr/Haberler/Kablo-İzolasyon-Malzemeleri), (Erişim Tarihi:Şubat 2023).
17. (Https://Muhendishane.Org/Kutuphane/Temel-Malzeme-Bilgisi/Polimer-Molekullerindeki-Yapisal-Farkliliklar/), (Erişim Tarihi: Şubat 2023)
18. Yıldırım, M.(2019). Poliüre Kaplı Metal Levhaların Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi Ve Zırh Malzemesi Olarak Kullanımının Değerlendirilmesi. Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü (Yüksek Lisanstezi), İstanbul
19. Bozdoğan, F., Üngün, S., Temel, E., & MENGÜÇ, G. (2015). Balistik Koruma Amaçlı Kullanılan Tekstil Materyalleri, Özellikleri ve Balistik Performans Testleri. **Tekstil Ve Mühendis**, 22(98), 84-103.
20. Somarathna, H. M. C. C., Raman, S. N., Mutalib, A. A., & Badri, K. H. (2015). Elastomeric Polymers For Blast And Ballistic Retrofitting Of Structures. **Journal Technology**, 76(1)
21. Chen, Y. S., Wang, B., Zhang, B., Zheng, Q., Zhou, J. N., Jin, F. N., & Fan, H. L. (2020). Polyurea Coating For Foamed Concrete Panel: An Efficient Way To Resist Explosion. **Defence Technology**, 16(1), 136-149
22. Feaga, M. K., (2007). ‘’The Effect Of Projectile Strike Velocity On The Performance Of Polyurea Coated RHA Plates Under Ballistic İmpact’’, Msc Thesis, Lehigh University, Pennsylvania
23. Youssef, G. H. (2011). Dynamic Properties Of Polyurea. University Of California, Los Angeles.
24. Öztürk, Ö. (2015). Poliüre Matris Malzemesi Ve Cam, Aramid, Karbon Elyaf Kumaş Takviyeleri Kullanılarak Üretilen Kompozit Malzemelerin Mekanik Davranışlarının İncelenmesi (Master's Thesis, Namık Kemal Üniversitesi).
25. Szafran, J., & Matusiak, A. (2016). Polyurea Coating Systems: Definition, Research, Applications, Parameters, 2(3).
26. Li, Y., Chen, C., Hou, H., Cheng, Y., Gao, H., Zhang, P., & Liu, T. (2019). The İnfluence Of Spraying Strategy On The Dynamic Response Of Polyurea-Coated

Metal Plates To Localized Air Blast Loading: Experimental İnvestigations. **Polymers**, 11(11), 1888.

27. Çelikel, A., Balcı, Y., Üner, B., & Bal, C. (2012). Av Tüfeği Namlu Uzunluğunun Saçma Dağılımına Etkisi Ve Atış Mesafesinin Belirlenmesinde Önemi.
28. Özer, G. (2008). Dış Balistik Analizinde İzdüşüm Alanı Etkilerinin Araştırılması (Master's Thesis, Kırıkkale Üniversitesi).
29. Mazur, R., Beczek, M., Janiszewski, J., Koperski, W., Polakowski, C., Fikus, B., Bieganowski, A. (2022). Experimental İnvestigations Of Crater Formation As A Result Of High-Velocity İmpacts On Sand Bed. **Plos One**, 17(3), E0265546.
30. Akçay, M. (2010). Balistik, 90-281.
31. Carlucci, D. E. (2007). Ballistics: Theory And Design Of Guns And Ammunition. CRC Press.
32. Lowry, E. D. (1968). Interior Ballistics: How A Gun Converts Chemical Energy İnto Projectile Motion. Doubleday.
33. Alper, İ. And Çoruhlu, A. (2006)"Silah Sistemleri Ve Balistik Ders Kitabı", Kara Harp Okulu Basım Evi, Ankara, 1-87 (2006)
34. L. Robert, Modern Exterior Ballistics, Schiffer Publishing,Ltd., 2012
35. Mazur, R., Beczek, M., Janiszewski, J., Koperski, W., Polakowski, C., Fikus, B., Bieganowski, A. (2022). Experimental İnvestigations Of Crater Formation As A Result Of High-Velocity İmpacts On Sand Bed. **Plos One**, 17(3), E0265546.
36. Carlucci, D. E., Jacobson, S. S., 2014. Ballistics : Theory And Design Of Guns And Ammunition. CRC Press, Taylor & Francis Group, **Boca Raton**, 586 Pp.
37. Rao, C. L., Narayanamurthy, V., & Simha, K. R. Y. (2016). **Applied İmpact Mechanics**. John Wiley & Sons
38. Hakan, M, (2017). Fonksiyonel Kademelendirilmiş Plakaların Farklı Mermi Çarpma Açılarında Balistik Limitlerinin Araştırılması. Erciyes Universitesi, Yüksek Lisans Tezi, Kayseri
39. Zukas, J. A. (Ed.). (1990). High Velocity İmpact Dynamics. Wiley-Interscience.
40. Zukas, J. A., Nicholas, T., Swift, H. F., Greszczuk, L. B., & Curran, D. R. (1982). Penetration And Perforation Of Solids. **Impact Dynamics**, 155-214.
41. Abdulwahab, M., Bijanzad, A., Khan, S. A., & Lazoglu, I. (2021). Effects Of Polyurea Coating On The Elastoplastic Behavior Of Additively Manufactured PLA Specimens. **Progress in Additive Manufacturing**, 1-8.

42. Jiang, Y., Zhang, B., Wei, J., & Wang, W. (2019). Study On The İmpact Resistance Of Polyurea-Steel Composite Plates To Low Velocity İmpact. **International Journal Of Impact Engineering**, 133, 103357.
43. Ackland, K., Anderson, C., & Ngo, T. D. (2013). Deformation Of Polyurea-Coated Steel Plates Under Localised Blast Loading. **International Journal Of Impact Engineering**, 51, 13-22.
44. Mohotti, D., Ngo, T., Raman, S. N., Ali, M., & Mendis, P. (2014). Plastic Deformation Of Polyurea Coated Composite Aluminium Plates Subjected To Low Velocity İmpact. **Materials & Design** (1980-2015), 56, 696-713.
45. Grujicic, M., Pandurangan, B., He, T., Cheeseman, B. A., Yen, C. F., & Randow, C. L. (2010). Computational İnvestigation Of İmpact Energy Absorption Capability Of Polyurea Coatings Via Deformation-İnduced Glass Transition. **Materials Science And Engineering: A**, 527(29-30), 7741-7751.
46. Zhang, P., Wang, Z., Zhao, P., Zhang, L., Jin, X. C., & Xu, Y. (2019). Experimental İnvestigation On Ballistic Resistance Of Polyurea Coated Steel Plates Subjected To Fragment İmpact. **Thin-Walled Structures**, 144, 106342
47. Mohotti, D., Ngo, T., Mendis, P., & Raman, S. N. (2013). Polyurea Coated Composite Aluminium Plates Subjected To High Velocity Projectile İmpact. **Materials & Design** (1980-2015), 52, 1-16.
48. Samiee, A., Amirkhizi, A. V., & Nemat-Nasser, S. (2013). Numerical Study Of The Effect Of Polyurea On The Performance Of Steel Plates Under Blast Loads. **Mechanics Of Materials**, 64, 1-10.
49. Bahei-El-Din, Y. A., Dvorak, G. J., & Fredricksen, O. J. (2006). A Blast-Tolerant Sandwich Plate Design With A Polyurea İnterlayer. **International Journal Of Solids And Structures**, 43(25-26), 7644-7658.
50. Hazell, P. J., Kister, G., Stennett, C., Bourque, P., & Cooper, G. (2008). Normal And Oblique Penetration Of Woven CFRP Laminates By A High Velocity Steel Sphere. **Composites Part A: Applied Science And Manufacturing**, 39(5), 866-874.
51. Harper, P. W., Sun, L., & Hallett, S. R. (2012). A Study On The İnfluence Of Cohesive Zone İnterface Element Strength Parameters On Mixed Mode Behaviour. **Composites Part A: Applied Science And Manufacturing**, 43(4), 722-734.

52. Raman, S. N., Ngo, T., Lu, J., & Mendis, P. (2013). Experimental İnvestigation On The Tensile Behavior Of Polyurea At High Strain Rates**. Materials & Design**, 50, 124-129.

53. Mines, R. A. W., & Jones, N. (1995). Approximate Elastic-Plastic Analysis Of The Static And İmpact Behaviour Of Polymer Composite Sandwich Beams. **Composites**, 26(12), 803-814

54. Liu, Q., Guo, B., Chen, P., Su, J., Arab, A., Ding, G., ... & Guo, F. (2021). Investigating Ballistic Resistance Of CFRP/Polyurea Composite Plates Subjected To Ballistic İmpact. **Thin-Walled Structures**, 166, 108111.

55. Sazhenkov, N. A., Semenov, S. V., Voronov, L. V., Kurakin, A. D., Nikhamkin, M. S., Stergiou, T., Silberschmidt, V. V. (2020). Polyurea-Coated Glass-Fibre-Reinforced Laminate Under High-Speed İmpact: **Experimental Study. Procedia Structural Integrity**, 28, 1572-1578.

56. Şen, M. (2016). Poliüretan Köpük Kaplı Plaklarda Takviye Kalınlığının Sistemin Dinamik Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi (Doctoral Dissertation, Yüksek Lisans Tezi).

57. Harikumar, R., & Devaraju, A. (2020). Exploration Of Mechanical Properties Of Polyurea Coated Mild Steel Plate And Aluminium Plate Sandwich Composites. **Materials Today: Proceedings**, 22, 1144-1148.

58. Stergiou, T., Baxevanakis, K. P., Roy, A., Sazhenkov, N. A., Nikhamkin, M. S., & Silberschmidt, V. V. (2021). Impact Of Polyurea-Coated Metallic Targets: Computational Framework. **Composite Structures**, 267, 113893.

59. Karabayır, B.,Bilişik,A., (2014) Çok Eksenli Ve Katmanlı Lif/Poliüretan Katı Yapısal Panellerin Geliştirilmesi Ve Özelliklerinin Karakterize Edilmesi, Erciyes Universitesi, Yüksek Lisans Tezi, Kayseri

60. Gökgöz, O. (2002). Investigation Of Monolithic And Multi-Layered Metallic Plates Against Projectile İmpact (Master's Thesis, Middle East Technical University).

61) Li, T.; Zhang, C.; Xie, Z.; Xu, J.; Guo, B.-H. A Multi-Scale İnvestigation On Effects Of Hydrogen Bonding On Micro-Structure And Macro-Properties İn A Polyurea. **Polymer 2018**, 145, 261–271.

62) Mohotti, D., Ngo, T., Mendis, P., & Raman, S. N. (2013). Polyurea Coated Composite Aluminium Plates Subjected To High Velocity Projectile İmpact. **Materials & Design** (1980-2015), 52, 1-16.

63) Gang, W.; Xin, W.; Chong, J.; Zhenru, G.; Tao, J.; Changxiao, Z.; Yujun, L. Anti-Blast Properties Of 6063-T5 Aluminum Alloy Circular Tubes Coated With Polyurea Elastomer: Experiments And Numerical Simulations. **Thin-Walled Struct.** 2021, 164, 107842.

64) Zhang, R., Huang, W., Lyu, P., Yan, S., Wang, X., & Ju, J. (2022). Polyurea For Blast And İmpact Protection: A Review. **Polymers**, 14(13), 2670.

65) MIL-DTL-46593B (MR) W/AMENDMENT 1, 11 August 2008. Projectile, Calibers .22, .30, .50, And 20 Mm Fragment-Simulating

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı: Cemile Şeyda YARDIM

Uyruğu: Türkiye (T.C)

EĞİTİM

Derece	Kurum	Mezuniyet Tarihi
Yüksek Lisans	Erciyes Üniversitesi ,Makine Mühendisliği (3.93)	2023
Lisans	OHÜ, Makine Mühendisliği (%30 İngilizce) (3,27)	2017

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görev
2020-Halen	Milli Savunma Bakanlığı, 2'nci Ana Bakım Fb.Md.lüğü	Makine Mühendisi
2018-2022	Group Atlantic of ERENSAN	Üretim Mühendisi
2017-2018	Adalet Bakanlığı, Personel Eğitim Merkezi Yapım İşi- Vedat KARAOĞLU İnşaat	Makine Mühendisi

YABANCI DİL

İngilizce