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

NİTİNOL-FİBER KOMPOZİT PLAKALI SANDVİÇ KOMPOZİTLERİN BALİSTİK DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

Hazırlayan
Berkan Sami KALIN

Danışman
Prof. Dr. Zeynep Gül APALAK
İkinci Danışman
Doç. Dr. Umut ÇALIŞKAN

Yüksek Lisans Tezi

Ocak 2025
KAYSERİ

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

NİTİNOL-FİBER KOMPOZİT PLAKALI SANDVİÇ KOMPOZİTLERİN BALİSTİK DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Hazırlayan
Berkan Sami KALIN

Danışman
Prof. Dr. Zeynep Gül APALAK
İkinci Danışman
Doç. Dr. Umut ÇALIŞKAN

Bu çalışma, Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından FYL-2021-11033 kodlu proje ile desteklenmiştir.

Ocak 2025
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.

Berkan Sami KALIN

İmza

“Nitinol-Fiber Kompozit Plakalı Sandviç Kompozitlerin Balistik Davranışının İncelenmesi” adlı Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi Lisansüstü Tez Önerisi ve Tez Yazma Yönergesi’ ne uygun olarak hazırlanmıştır.

Hazırlayan	**Danışman**
Berkan Sami KALIN	Prof. Dr. Zeynep Gül APALAK
İmza	İmza

Makine Mühendisliği ABD Başkanı

Prof. Dr. Orhan AKANSU

İmza

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca bana her türlü desteği sunan, bilgi birikimini paylaşan, fedakârlıkta bulunan değerli hocam Prof. Dr. Zeynep Gül APALAK'a teşekkürlerimi sunarım.

Eğitimimin başından sonuna kadar bana yol gösteren, destekleyen, gelişimime büyük katkılar sunan, bilgisini esirgemeyen fedakâr hocam Doç. Dr. Umut ÇALIŞKAN'a minnettarım.

Çalışmalarım boyunda kıymetli bilgilerini ve desteğini esirgemeyen hocam Doç. Dr. Murat AYDIN'a teşekkürü borç bilirim.

Bu çalışmaya destek veren Bilimsel Araştırma Projeleri Birimine teşekkür ederim.

Eğitim hayatım boyunca beni her alanda destekleyen, bu günlerimin mimarı çok kıymetli aileme teşekkür ederim.

Her zaman her konuda yanımda olan, beni destekleyen kıymetli dostlarıma teşekkür ederim.

Berkan Sami KALIN

OCAK 2025, KAYSERİ

NİTİNOL-FİBER KOMPOZİT PLAKALI SANDVİÇ KOMPOZİTLERİN BALİSTİK DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

Berkan Sami KALIN

Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
Yüksek Lisans Tezi, Ocak 2025
Danışman 1: Prof. Dr. Zeynep Gül APALAK

Danışman 2: Doç. Dr. Umut ÇALIŞKAN

ÖZET

Bu tez çalışmasında karbon prepregler ve nitinol plaka, vakum yöntemi ile birleştirilerek fiber metal laminat yapı elde edilmiştir. Oluşturulan fiber metal laminat yapı, çift kat Airex köpük ve nitinol plaka ile yapıştırılarak yeni bir sandviç yapı elde edilmiştir. Buna ek olarak toplam kalınlığı aynı olan tek kat köpüklü sandviç yapı oluşturulmuştur. Üretilen numunelere balistik testler yapılmıştır. Balistik testler gazlı atış silahı (gas gun) yardımı ile farklı hızlarda yapılmıştır. Mermi çekirdeğinin penetrasyonu yüksek kare hızına sahip kamera ile kayıt altına alınmıştır. Balistik testin sonucunda deformasyona uğrayan numuneler tomografi cihazında görüntüleri alınarak incelenmiş ve sonuçlar eklenmiştir. Tek katlı Airex köpük kullanılan numune, çift katlı köpüğe sahip yapıdan daha mukavim davranış göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Nitinol, Airex, Vakum, Tomografi

INVESTIGATION OF BALLISTIC BEHAVIOR OF NITINOL-FIBER COMPOSITE PLATE SANDWICH COMPOSITES

Berkan Sami KALIN

Erciyes University, Graduate School of Natural and Applied Sciences
Master Thesis, January 2025
Supervisor 1: Prof. Zeynep Gül APALAK

Supervisor 2: Assoc. Prof. Umut ÇALIŞKAN

ABSTRACT

In this thesis, a fiber metal laminate structure was obtained by combining carbon prepregs and nitinol plate with vacuum method. A new sandwich structure was obtained by bonding the formed fiber metal laminate structure with double layers of Airex foam and nitinol plate. In addition, a single layer foamed sandwich structure with the same total thickness was created. Ballistic tests were carried out on the produced samples. Ballistic tests were carried out at different speeds with the help of a gas gun. Penetration of the bullet core was recorded with a high frame rate camera. The samples, which were deformed as a result of the ballistic test, were examined by taking their images on the tomography device and the results were added. The sample using single-layer Airex foam showed a stronger behavior than the structure with double-layered foam.

Keywords: Nitinol, Airex, Vacuum, Tomography

İÇİNDEKİLER

NİTİNOL-FİBER KOMPOZİT PLAKALI SANDVİÇ KOMPOZİTLERİN BALİSTİK DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK ii

YÖNERGEYE UYGUNLUK iii

KABUL VE ONAY iv

ÖNSÖZ v

ÖZET vi

ABSTRACT vii

İÇİNDEKİLER viii

KISALTMALAR xii

TABLOLAR LİSTESİ xiii

ŞEKİLLER LİSTESİ xiv

GİRİŞ 1

1. BÖLÜM

GENEL BİLGİLER ve LİTERATÜR ÇALIŞMASI

1.1. Kompozit Malzemeler……..…3

1.1.1. Kompozit Malzemelerin Avantajları ve Dezavantajları……....3

1.1.2. Kompozit Malzeme Elemanları……4

1.1.3. Matris Malzemesine Göre Kompozitler……..5

1.1.3.1.Metal Matrisli Kompozitler(MMK)……...6

1.1.3.2.Seramik Matrisli Kompozitler(CMK)……...6

1.1.3.3.Polimer Matrisli Kompozitler(PMK)…….6

1.2. Üretim yöntemleri…….6

1.2.1. Sıvı Fazda Üretim Teknikleri……...6

1.2.1.1. Sıvı metal emdirme yöntemi (infiltrasyon)……..…….....7

1.2.1.2. Yerinde İmalat(İn-situ)……..……8

1.2.1.3. Püskürtme……..……..8

1.2.1.4. Karıştırma Döküm……..……9

1.2.2. Katı Hal Üretim Teknikleri……..……..10

1.2.2.1. Toz Metalurjisi……..11

1.2.2.2. Difüzyon Bağı……12

1.2.2.3. Elyaf Sarma Yöntemi……13

1.2.2.4. El Yatırma Yöntemi……..13

1.2.2.5. Püskürtme yöntemi……...14

1.2.2.6. Vakumlu torbalama yöntemi…….....15

1.2.2.7. Otoklav Yöntemi……...15

1.2.3. Kapalı kalıplama yöntemleri……..16

1.2.3.1. Profil çekme yöntemi (Pultruzyon)…….16

1.2.3.2. Reçine Transfer Yöntemi (RTM)……17

1.2.3.3. Baskı Kalıplama Yöntemi……17

1.2.3.4. Enjeksiyon Yöntemi……..18

1.2.3.5. Savurma Döküm Yöntemi (Santifrüj)…….19

1.3 Literatür Taraması……..19

2. BÖLÜM

YÖNTEM VE MATERYAL

2.1. Giriş……..35

2.2. Şekil Hafızalı Malzemeler……..35

2.3. Nitinol……..36

2.4. Süperelastiklik……39

2.5. Fiber Metal Laminat Kompozitler……40

2.6. Numunenin üretimi……43

2.7. Balistik……52

2.7.1. İç Balistik……..52

2.7.2. Dış Balistik……53

2.7.3. Hedef Balistiği……..53

2.7.4. Adli Balistik……..53

2.8. Balistik Test Sistemi……...53

3. BÖLÜM

BULGULAR

3.1 Yüksek Hızlı Darbe Deneyleri.....60

4. BÖLÜM

TARTIŞMA-SONUÇ ve ÖNERİLER

4.1.Sonuçlar…….....77

KAYNAKÇA 79

EKLER.....86

EK 1. 86
ÖZGEÇMİŞ 87

KISALTMALAR

NiTi: Nitinol

FSP: Fragment Simulating Projectiles

ARALL: Aramid Takviyeli Laminat

CARAL: Karbon Takviyeli Laminat

GLARE: Cam Takviyeli Laminat

RTM: Reçine Transfer Yöntemi

FML: Fiber Metal Laminat

AL: Alüminyum

UHMW-PE: Ultra Yüksek Moleküler Ağırlıklı Polietilen

FGM: Fonksiyonel Kademelendirilmiş

NIVR: Hollanda Havacılık Programları Kurulu

NOL: ABD Savaş Gereçleri Donanma Laboratuarı

TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 2.1. FSP Mermi Özellikleri 56

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. Kompozit Malzeme Yapısı…….……..…….2

Şekil 1.2. Kompozit Malzeme Katmanları……...…….…….……..…….5

Şekil 1.3. Sıvı Metal Emdirme Metodu...…….……..……...7

Şekil 1.4. Püskürtme Yöntemi……..…….……...…….9

Şekil 1.5. Karıştırma Döküm Yöntemi……..…….10

Şekil 1.6. Toz Metalurjisi Yöntemi…….……11

Şekil 1.7. Difüzyon Bağı Yöntemi…….……12

Şekil 1.8. Elyaf Sarma Yöntemi…….……13

Şekil 1.9. El Yatırma Yöntemi……..…….……14

Şekil 1.10. Püskürtme Yöntemi……..…….……14

Şekil 1.11. Vakumlu Torbalama Yöntemi…….…….……15

Şekil 1.12. Otoklav Yöntemi…….……..16

Şekil 1.13. Profil çekme yöntemi (Pultruzyon) …….……16

Şekil 1.14. Reçine Transfer Yöntemi (RTM) ……...…….……17

Şekil 1.15. Baskı Kalıplama Yöntemi……...……18

Şekil 1.16. Enjeksiyon Yöntemi…….……18

Şekil 1.17. Savurma Döküm Yöntemi (Santifrüj) …….…….……19

Şekil 2.1. Şekil Hafızalı Malzeme……...35

Şekil 2.2. Uçaklarda Kullanılan Şekil Hafızalı Malzemeler…..……36

Şekil 2.3. Damara Stent Uygulaması……...……37

Şekil 2.4. Şekil Hafızalı Alaşımlarda Dönüşüm Grafiği.……...…….38

Şekil 2.5. Şekil Hafıza Etkisi……...……...…….39

Şekil 2.6. Süperelastik dönüşüm……...……...40

Şekil 2.7. Fiber Metal Laminat Kompozit Yapısı……...……41

Şekil 2.8. Airbus A380'de FML kullanımı……...……..….42

Şekil 2.9. Prepreg Rulonun Saklama Koşulu……...……...43

Şekil 218.10. FML Yapısı İçin Prepreg Boyutlandırması…..……..44

Şekil 2.11. Nitinol Plaka…….…….44

Şekil 19.12. Nitinol Plaka İle Birleştirilen Prepreg…….…….…….45

Şekil 2.13. Nitinol ve Prepreg Arası Hava Boşluğunun Alınması…..…….45

Şekil 2.14. Koruyucu Bandın Prepregden Ayrılması…….…….46

Şekil 2.15. Kürlenmeye Hazırlanmış FML…….……46

Şekil 2.16. Vakum Torbalama Yöntemi İle Kürlenme…….……...47

Şekil 2.17. Vakum Altında Bırakılan FML…….……....47

Şekil 2.18. Sandviç Yapı İçin Hazırlanan Kürlenmiş FML…….……...48

Şekil 2.1920. Sandviç Yapı İçin Yapıştırıcı Kullanımı.....…….…….48

Şekil 2.20. Spatula İle Yayılan Yapıştırıcı…….…….49

Şekil 2.21. Airex Köpük İle Nitinol Plakanın Yapıştırılması.…….49

Şekil 2.22. Nitinol Plakanın Airex Köpük İle Birleşime Hazırlanması.…….50

Şekil 2.23. Airex Köpük Üzerine Yapıştırıcı Uygulanması..….……50

Şekil 2.24. Yapıştırılmış Numune…….…….……51

Şekil 2.25. Sağlıklı Birleşme İçin Ağırlık Uygulaması…….……..51

Şekil 2.26. Teste Hazır Numune…….……52

Şekil 2.27. Balistik Test Sistemi…….……54

Şekil 2.28. Lançer Sistemi…….…….……54

Şekil 2.29. Gaz Sistemli Atış Silahı…….……..….55

Şekil 2.30 Bilgisayarlı Kontrol Ünitesi…….……55

Şekil 2.31. Hız Ölçüm Perdesi…….……....56

Şekil 2.32. 0.30 Kalibre FSP Mermi…….…….….57

Şekil 2.33. Sabot İçine Yerleştirilmiş FSP Mermisi…….……...57

Şekil 2.34.. Açılı Bağlama Aparatı……..58

Şekil 2.35. Yüksek Hızlı Görüntüleme Cihazı…….……...58

Şekil 2.36. Bilgisayar Kontrollü Görüntüleme Sistemi…….……..59

Şekil 2.37. Birinci ve İkinci Numune Dizilimi……59

Şekil 2.38. Birinci ve İkinci Numune Dizilimi……59

Şekil 3.1. Deney Numunesi. ……...……60

Şekil 3.2 Bir Numaralı Numune Ön ve Arka Yüzü...……..61

Şekil 3.3. 628m/s Hıza Ait Yüksek Hızlı Kamera Görüntüsü…...……..61

Şekil 3.4. 648m/s s Hıza Ait Yüksek Hızlı Kamera Görüntüsü…...…….……..62

Şekil 3.5. 628 m/s mermi hızı için üst plaka referans alınmış numunenin tomografi (CT-Xray) görüntüsü……...62

Şekil 3.6. 628 m/s mermi hızı için orta plaka referans alınmış numunenin tomografi (CT-Xray) görüntüsü …….…….....63

Şekil 3.7. 648 m/s mermi hızı için üst plaka referans alınmış numunenin tomografi (CT-Xray) görüntüsü…….…….....63

Şekil 3.8. 648 m/s mermi hızı için orta plaka referans alınmış numunenin tomografi (CT-Xray) görüntüsü.……...…….…….....64

Şekil 3.9. 628 ve 648 m/s mermi hızları için mermi ilerlemesi ve plaka çatlaklarının ölçülmesişş……...…….…….....64

Şekil 3.10. İki Numaralı Numune Ön Yüzü…..…….....66

Şekil 3.11. 886,4 m/s Hıza Ait Yüksek Hızlı Kamera Görüntüsü.…….....66
Şekil 3.12. 890,2 m/s Hıza Ait Yüksek Hızlı Kamera Görüntüsü….……..67

Şekil 3.13. 886 m/s mermi hızı için üst plaka referans alınmış numunenin tomografi (CT-Xray) görüntü…….……..67
Şekil 3.14. 886 m/s mermi hızı için orta plaka referans alınmış numunenin tomografi (CT-Xray) görüntüsü…….……..68
Şekil 3.15. 886 m/s mermi hızı için alt plaka referans alınmış numunenin tomografi (CT-Xray) görüntüsü…….……..68

Şekil 3.16. 890 m/s mermi hızı için üst plaka referans alınmış numunenin tomografi (CT-Xray) görüntüsü…….……..69
Şekil 3.17. 890 m/s mermi hızı için orta plaka referans alınmış numunenin tomografi (CT-Xray) görüntüsü…….……..69
Şekil 3.18. 890 m/s mermi hızı için alt plaka referans alınmış numunenin tomografi (CT-Xray) görüntüsü…….……..70

Şekil 3.19. 886 ve 890 m/s mermi hızları için mermi ilerlemesi ve plaka çatlaklarının ölçülmesi…….…….70
Şekil 3.20. Üç Numaralı Numune Ön Yüzü…….……...……72

Şekil 3.21. 659,9 m/s Hıza Ait Yüksek Hızlı Kamera Görüntüsü….……..72

Şekil 3.22. 889,6 m/s Hıza Ait Yüksek Hızlı Kamera Görüntüsü.……..73
Şekil 3.23. 660 m/s mermi hızı için üst plaka referans alınmış numunenin tomografi (CT-Xray) görüntüsü……...……73

Şekil 3.24. 660 m/s mermi hızı için alt plaka referans alınmış numunenin tomografi (CT-Xray) görüntüsü….……..74
Şekil 3.25. 890 m/s mermi hızı için üst plaka referans alınmış numunenin tomografi (CT-Xray) görüntüsü…….……..74
Şekil 3.27. 890 m/s mermi hızı için alt plaka referans alınmış numunenin tomografi (CT-Xray) görüntüsü…….……..75
Şekil 3.28. 660 ve 890 m/s mermi hızları için mermi ilerlemesi ve plaka çatlaklarının ölçülmesi……...…….……..75

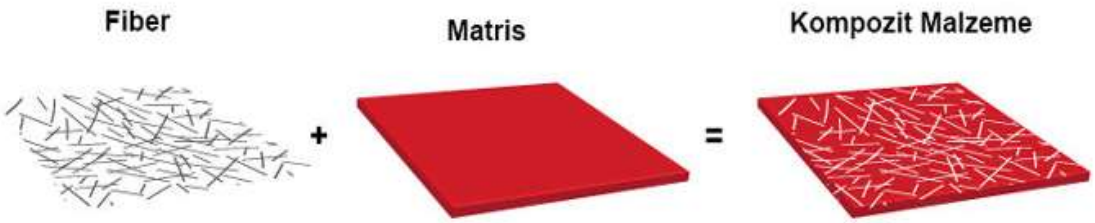
GİRİŞ

Kompozit malzeme, iki ya da daha fazla malzemenin istenen özellikleri sağlaması amacı ile makro boyutta ve birbiri içersinde çözünmeden birleştirilmesi ile meydana gelen yeni bir malzeme türüdür. Kökeni milattan öncesine dayanan kompozit malzemeler birçok farklı alanda kullanılmışlardır. Bilinen en eski kompozit malzeme örneği ise tahta parçalarının birleştirilmesi ile oluşturulan kontrplaktır. Mısır ve Mezopotamya bölgesinde yapılan arkeolojik çalışmalarda balçık haline getirilen toprağın saman ile birleştirilerek elde edilen kerpiç malzemesinin milattan önce 2181-2055 yılları arasında kullanıldığı bilgisine ulaşılmıştır. 13. Yüzyılda günümüz kompozit mantığına uyan Moğol yayları yüksek menzile ulaşmıştır.

Ortaçağ Avrupasında ok başı gövdeleri farklı malzeme tabakalarından yapılmıştır. Çinliler ve Japonlarda daha çok darbe sönümleme direncini iyileştirmek için metal ve işlem görmüş derinin bir araya getirilmesi ile ok yayı gövdesi yapmışlardır. Bununla beraber herkesin bildiği tahta, ahşap ve kemik'te doğal kompozit malzemelerdir. Ancak tahta higroskopik(havadaki nemi emme özelliği olan) olduğu için tahtadan yapılan malzemeler boyutsal olarak kararlı değil ve keza biyolojik etkilere maruz kalarak bileşimi bozulmaktadır.

Fiber takviyeli ilk kompozit 1935 yılında Owens Corning şirketi tarafından üretilmiştir. 1940'lı yıllara gelindiğinde ise II . Dünya Savaşı'nın başlaması kompozit malzemelere olan ilginin artmasına neden olmuştur. Bu yıllarda cam elyaf takviyeli kompozitler yaygınlaşmıştır. 1961 yılında cam elyaf takviyeli kompozitlerden daha iyi mekanik özelliklere sahip karbon fiber takviyeli kompozitlerin patenti alınmıştır. 1971 yılında ise darbe direnci ve ısı dayanımı daha yüksek olan kevlar piyasa sürülmüştür. 1980 yıllarından sonra ise üretiminin kolaylaşması ile kullanım alanları artmıştır [1].

Bugün taş, kum, kireç, demir, ve çimento ile oluşturulan kompozit malzeme evlerimizi oluşturmaktadır. Kompozit malzemeye en güncel örneklerden biri de kağıttır. Selüloz ve reçineden oluşan kağıt, günümüzde yaşamımızın her alanında eşsiz bir kullanım aracı olarak insanlığın hizmetine sunulmuştur. Yaygın olarak kullanılan kompozit malzemelere diğer bir örnek otomobil lastikleridir. Bunlar elastomerik matris içinde çelik tel yada iplik takviyeli kompozitlerdir. Günümüzde kompozit malzemelerin kullanım alanı çok geniş boyutlara ulaşmıştır.



Şekil 1.1. Kompozit Malzeme Yapısı

1. BÖLÜM

GENEL BİLGİLER ve LİTERATÜR ÇALIŞMASI

1.1. Kompozit Malzemeler

İstenen amaç için tek başlarına uygun olmayan farklı iki veya daha fazla malzemeyi istenen özellikleri sağlayacak şekilde belirli şartlar ve oranlarda fiziksel olarak, makro yapıda bir araya getirilerek elde edilen malzemeye, başka bir deyişle birbirlerinin zayıf yönünü düzelterek üstün özellikler elde etmek amacı ile bir araya getirilmiş değişik tür malzemelerden veya fazlardan oluşan malzemelere **kompozit malzeme** denir.

İçyapıları çıplak gözle incelendiğinde (makroskobik muayene) yapı bileşenlerinin seçilip ayırt edilmesi mümkündür. Yapılarında birden fazla sayıda fazın yer aldığı klasik alaşımlar ise makro ölçüde homojen olmalarına rağmen mikro ölçüde (mikroskobik muayene ile seçilebilen) heterojen malzemelerdir. Kompozit malzemelerde yapıyı oluşturan bileşenler birbiri içinde çözünmezler, kimyasal olarak inert davranırlar. Ancak özellikle metalik sistemlerde düşük oranlarda bile olsa, bir miktar çözünme bileşenler arasında kompozit özelliklerini etkileyebilen ara yüzey reaksiyonları görülebilir.

1.1.1. Kompozit Malzemelerin Avantajları ve Dezavantajları

Kompozit malzemeler özellikle üreticiler, tasarımcılar ve mühendisler başta olmak üzere birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Kullanımının yaygın olmasında en etkili faktör performans avantajlarının çok yüksek ve çeşitli olmasıdır. Bu sayede üretilecek yeni bir kompozit malzemede istenilen özellikleri yakalama imkânı oluşur.

Kompozit malzemelerin avantajlarını aşağıdaki gibi sıralayabiliriz:

- Yüksek mukavemet

- Yüksek rijitlik

- Kolay şekillendirme

- Korozyona karşı dayanıklılık

- Aşınma direnci

- Hafiflik

- Isıya ve ateşe karşı direnç

- Elektriksel özellikler

- Yorulma ömrü

- İmalat kolaylığı

Kompozit malzemelerin avantajlarının çok olmasına karşın dezavantajları da mevcuttur:

- Ham maddenin pahalı olması

- Üretim güçlüğü

- Sınırlı servis (tamir-bakım-geri kazanım)

-Yeni gelişen bir teknoloji olması nedeniyle firmaların ve üreticilerin deneyimsiz olmaları [2].

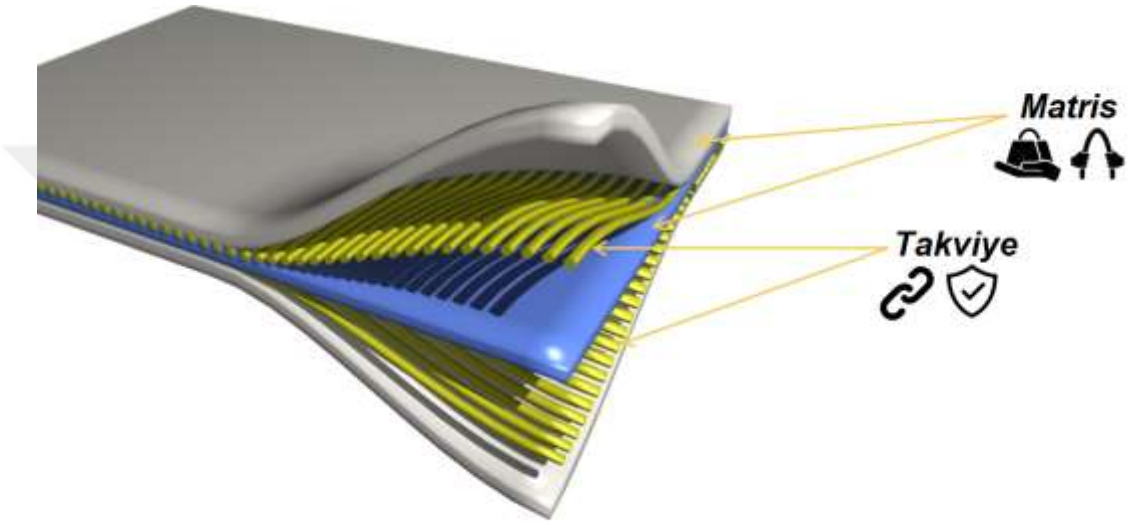
1.1.2. Kompozit Malzeme Elemanları

Kompozit malzemeler bir matristen(sürekli faz) oluşup takviye(süreksiz faz) ile desteklenen malzemelerdir.

Matrisin görevi, takviyeyi birleştirip bir arada tutarak dış etkilere olan direncini arttırmaktır. Matristen beklenen özellik ise takviye malzeme ile kuvvetli bağ kurmasıdır. Genellikle takviye malzemeye oranla düşük mukavemete ve daha yüksek şekil alabilme özelliğine sahiptir.

Takviyeler malzemenin maruz kaldığı dış yüklerin çoğunluğunu taşır. Yüksek dayanıklılık ve kırılma olmadan yüksek şekil değiştirebilme kabiliyetinde sahip olması beklenir. Takviye malzemeleri toz formunda veya lif şeklinde olabilir. Takviyenin dağılımı ve boyutları kompozit malzemenin yapısını belirler [3].

Kompozit malzemelerde kullanılan matris ve takviyenin çeşitleri aşağıdaki şekilde gösterilmiştir.



Şekil 1.2. Kompozit Malzeme Katmanları

1.1.3. Matris Malzemesine Göre Kompozitler

Matris malzemeler kendi içersinde üç gruba ayrılır:

1. Metal Matrisli Kompozitler(MMK)
2. Seramik Matrisli Kompozitler(CMK)
3. Polimer Matrisli Kompozitler(PMK)

1.1.3.1.Metal Matrisli Kompozitler(MMK)

Metal matrisli kompozitlerin içerisinde metal matris malzemeleri yer alır. Metal matrisli kompozitlerin üretilmesi için ağırlıklı olarak metal alaşımları tercih edilmektedir. Bunun yanında diğer mühendislik malzemeleri de metal alaşım yerine kullanılabilir.

Tercih edilen malzemelere örnekler Ti, Co, Fe, Ni, Mo, Mg olarak sıralanabilir. Bu metaller ve alaşımları, yüksek süneklik ve mukavim özellikleri sebebi ile çok tercih edilen matris malzemeleridir. Metal matrisli kompozitler çoğunlukla uzay ve havacılık uygulamalarında kullanılan yardımcı malzemelerde, teleskopta ve platform taşıyıcılarda kullanılır [4] [5].

1.1.3.2.Seramik Matrisli Kompozitler(CMK)

Metallerin metal olmayan elementler ile birleşmesi sonucunda oluşan inorganik bileşiklere seramik denir. Genellikle kil ve kaloen gibi maddelerin yüksek sıcaklık altında bırakılarak pişirilmesi ile oluşurlar. Başlıcaları silisyum karbür, alüminyum oksit, titanyum nitrür ve titanyum karbürdür. Sandviç yapılardan oluşan zırhlar, savunma alanında kullanılan çeşitli malzemelerin üretimi ve uzay araçları önemli kullanım alanlarıdır [4][5].

1.1.3.3.Polimer Matrisli Kompozitler(PMK)

Polimer matrisli kompozitlerin üretilmesinde, polimer reçineler matris malzemesi olarak kullanılırken elyaf malzemesi de takviye elemanı olarak kullanılır. Düşük maliyeti ve üretim kolaylığı sebebi ile çok yaygın kullanım alanına sahip kompozit yapılardır [4][5].

1.2. Üretim yöntemleri

Metal matrisli kompozit malzemelerin üretim yöntemleri katı ve sıvı faz olarak ikiye ayrılabilir.

1.2.1. Sıvı Fazda Üretim Teknikleri

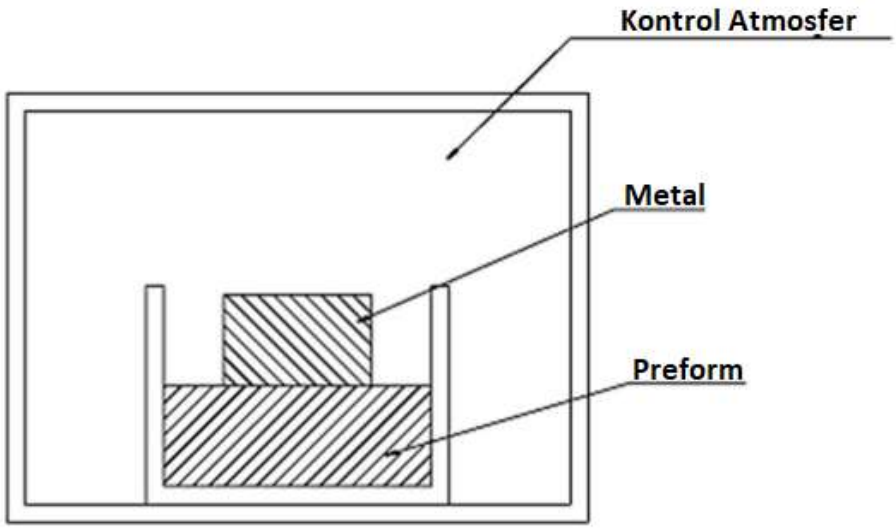
Bu teknik, sıvı halde olan metal matrisin takviye malzeme ile birleştirilme işlemidir. Metal matrisli kompozitler, sıvı metal matrisinin yüksek faydasından ötürü genellikle sıvı fazda üretim teknikleri ile üretilirler. Ergiyik halde matris malzemesi, hızlı işleme oranı, istenen şekle yakınlık, hafif metaller ile kaliteli bir üretim yapılması gibi önemli avantajlara sahiptir. Sıvı fazda üretim tekniklerinden yaygın olanlar 4 başlıkta incelenebilir:

1.2.1.1. Sıvı metal emdirme yöntemi (İnfiltrasyon):

Bu yöntem elyaf takviyeli metal matrisli kompozit malzemelerin üretiminde kullanılır. Yöntemde öncelikle uygun bir bağlayıcı ile ön şekil(preform) hazırlanır. Bu aşamada kullanılacak elyaf malzemenin doğrultuları belirlenir. Hazırlanmış olan model kalıba yerleştirilir. Kalıp içerisine erimiş metal enjeksiyonu yapılır. Bu esnada organik bağlar yanar ve katılaşmaya bırakılır. Sıvı metal emdirilmesi basınç altında yapılır. Dolayısıyla matris malzeme elyaf malzemenin arasına girerek ortaya çıkan atık gazların dışarı atılması sağlanır.

Sıvı metal emdirme yönteminde metalin nüfuziyeti basınçsız veya basınçlı olabilir. Basınçlı emdirme yöntemi kendi içerisinde basınç altında ve vakumlama olarak ikiye ayrılır.

Basınçsız yöntem tercih edildiğinde öncelikle hazırlanan ön şekil kalıp içerisine yerleştirilir. Daha sonra ön şeklin üzerine sıvı metal dökülür ve katılaşmaya bırakılır. Katılaşmış kompozitin yoğunluğunu %100 seviyesine çıkarmak için sıcak presleme işlemi uygulanır. Bu yöntemin tercih edildiği parçalarda sıklıkla ıslatma sorunu ile karşılaşılır. Bu nedenle özellikle ıslatma sorunu olmayacak ikililer için uygundur [5][6].



Şekil 1.3. Sıvı Metal Emdirme Metotu

Vakum ile metal emdirme yönteminde sıvı metal, vakum basıncının etkisi ile hazırlanan ön şekle nüfuz eder. Sıvı metal sıcaklığı, emdirme süresi ve uygulanan vakum basıncı

ortaya çıkacak ürün için önemli parametrelerdir. Bu yöntem ile alüminyum ve magnezyum bazlı kompozit malzemeler başarılı bir şekilde üretilebilir [5][6].

Basınçlı yöntem tercih edildiğinde ise sıvı metal, ön şekil veya kalıp içerisine basınçlı bir gaz ile iletilir. Sıvı metal ön şekilde yer alan boşlukların arasını doldurarak nihai ürünün ortaya çıkmasını sağlar. Sıkıştırma basıncının arttırılması gözenekleri en düşük seviyeye indirir ve işlemin süresini kısaltır. Bu yöntem ile yaklaşık %50 yoğunluğa sahip silisyum karbürün (SiC) kalay ile infiltrasyonu sağlanabilmektedir [5][6].

1.2.1.2. Yerinde İmalat(İn-situ)

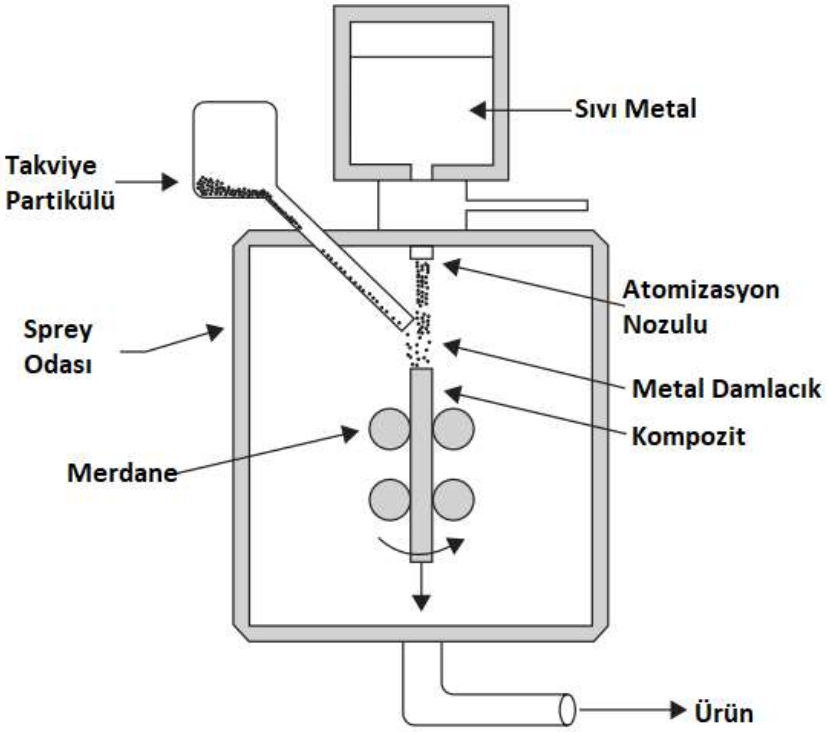
Yerinde imalat tekniği matris malzemesinin içerisinde takviye paçacıklar üretimini içerir. İki ve ya daha fazla bileşenin, ergimiş halde olan metal içersinde reaksiyona girmesi sonucu matris malzemede takviye parçacıkların oluşmasını sağlayarak kompozit malzemeyi oluşturur. Bu teknik ile matris malzeme içinde homojen dağılıma sahip ince takviye elemanı elde edilir. Ek olarak matris malzeme ile takviye parçacıklar arasında iyi bir bağ oluşur. Böylelikle daha küçük boyuta sahip takviye parçacıklara sahip kompozit malzemeler üretilir [7].

Yöntemin temelinde istenen takviye parçacıkları oluşturmak için ekzotermik reaksiyona girecek bileşiklerin ergimiş halde olan metal içerisine ilave edilmesidir. Oluşturulan kompozit malzemede takviye parçacıkların oranı yüksek olabilmektedir. Bu oranın azaltılması için matris malzemenin oranı arttırılır. Yöntemin kullanıldığı malzemelerde TiB2 ve TiC takviye parçacık olarak kullanılmaktadır. İşlem esnasında sıcaklığın yüksek tutulması reaksiyon hızını arttır. Bu nedenle takviye parçacıklar büyük boyuta sahip olur. Genellikle matris malzeme olarak Ni, Al ve ya intermetalik bir bileşik kullanılır. Yerinde imalat yöntemi yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir [8].

1.2.1.3. Püskürtme:

Bu yöntemde metaller veya alaşımlar ergitilme noktasına getirildikten sonra atıl bir gaz veya su ile küçük parçalara ayrıştırılmaktadır. Ayrıştırılan metallerde hızla katılaşma meydana gelir. Bu yöntem takviye elemanı olarak parçacıkların eklenmesi ile kompozit malzeme üretimi için şekillendirilmiştir. Böylelikle dakika 6-10kg gibi yüksek üretim hızına ulaşırken, hızlı katılaşma oranı ile matris ve takviye parçacık arasında herhangi reaksiyonun düşük seviyede kalmasını sağlar. Üretim anında kompozit malzemenin yoğunluğunu arttırmak ve istenen şekli vermek için merdaneler kullanılır. Bu metot

kullanılarak üretilen kompozit malzemelerde hızlı katılaşma nedeni ile ince taneli matris malzemesinin oluşması ve ara yüzey reaksiyonlarının en düşük seviyede olması, üretilen kompozit malzemenin dayanım değerlerini yükseltir.



Şekil 1.4. Püskürtme Yöntemi

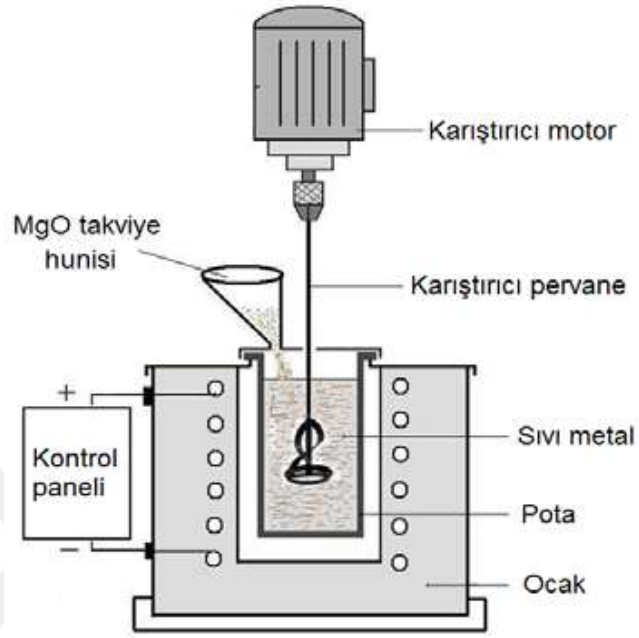
Üretilen kompozit malzemelerin istenen kalitede olmasını belirleyen parametreler vardır. Bunlar takviye parçacıklarının eklenme hızı ve sıcaklık değeri, ergiyen metallerin başlangıç sıcaklığıdır.

Bu yöntem üretimde kullanılacak ekipmanların yüksek sermaye maliyeti nedeni ile oldukça pahaldır. Püskürtme yöntemi ile alüminyum-silisyum döküm alaşımları, 2000, 6000, 7000, 8000 serisi dövme alaşımların dayanımını arttırmak ve silisyum karbür içeren çok sayıda alüminyum alaşımları için kullanılır.

1.2.1.4. Karıştırma Döküm:

Bu işlem, ergitilmiş metallerin, ergitme potasında yer alan karıştırıcı pervanenin oluşturduğu girdap ile karıştırılmasını kapsar. Seramik parçacıklar istenilen miktarda karışımın içerisine eklenir. Homojen dağılımdan sonra kalıplara dökülür. Takviye

parçacıklarının ıslanabilirliğinin düşük olması nedeni ile pervanenin oluşturduğu karıştırma hareketine ihtiyaç duyulur. Bu sayede tekdüze bir karışım elde edilebilir.



Şekil 1.5. Karıştırma Döküm Yöntemi

Karıştırmalı döküm yöntemi, metal matrisli kompozitlerin üretiminde en ekonomik olanıdır. Buna ek olarak kaliteli bir kompozit malzeme üretmek için birtakım değerlerin kontrol edilmesi gerekmektedir. Değerler istenen düzeyde değil ise ıslanmama veya düşük ıslaklık, parçacıklarda homojen olmayan dağılıma neden olur. Bu durum üretilen malzemenin beklenen özellikleri verememesine yol açar [9].

1.2.2. Katı Hal Üretim Teknikleri

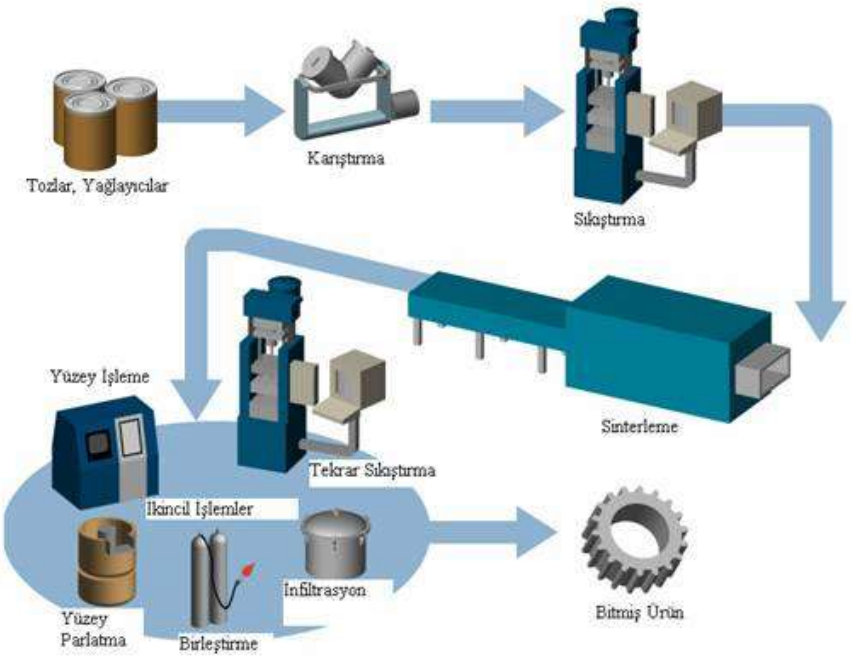
Sıvı fazda üretim yöntemlerinde takviye elemanının matris içerisinde dağılımını kontrol etmek yaşanılan sorunların başında gelir. Sıvı faz tekniklerinin yüksek sıcaklıkta gerçekleşmesi de ara yüzey reaksiyonlarına yol açabilir. Matris ve takviye arasında gerçekleşen reaksiyonlar ortaya çıkan kompozit malzemenin mekanik özeliklerine olumsuz etkide bulur. Katı hal üretim yöntemlerinde çıkılan sıcaklıkların derecesi, sıvı faz yöntemlerine göre daha düşük olduğu için bu tür sorunlar yaşanmamaktadır. Katı halde üretim yöntemleri arasında en yaygın kullanılanı toz metalurjisi yöntemidir. Diğer bir yöntem ise difüzyon bağı yöntemidir.

1.2.2.1. Toz Metalurjisi

Toz metalurjisi, metal-metal ile metal-seramik bazlı kompozit malzemelerin üretiminde kullanılan en yaygın işlemdir. Diğer imalat yöntemlerine oranla daha ekonomik olan toz metalurjisi, genellikle yüksek ergime sıcaklığına sahip matris malzemeler için kullanılmaktadır. Bu yöntem ile matris ve takviye arasında oluşan reaksiyonlar sonrasında meydana gelen kırılgan faz oluşumu en düşük seviyeye indirilmektedir. Buna ek olarak katılaşma büzülmesinin sebebi ile oluşan artık gerilmeler bu yöntem ile azaltılmaktadır.

Toz metalurjisi 4 aşamadan oluşur:

İlk aşama tozların karıştırılması ile başlar. Bu aşamada preslemeyi kolaylaştırmak amacı ile yağlayıcı ve metal tozları karıştırılır. Karıştırma aşamasında oluşturulan karışımın homojen olması toz metalurjisi ile yapılan üretimin en önemli noktalarından biridir. Metal tozu ile takviye tozlarının arasındaki boyut farkı topaklanmalara neden olabilir. Topaklanma homojen dağılımı engelleyerek oluşan malzemenin mekanik özelliklerinin düşmesine neden olur. Topaklanma ve sürtünmeyi azaltmak için yağlayıcı kullanmak önem arz eder. Ayrıca yağlayıcı ile preslenen parçanın kalıptan çıkarılması kolaylaşır [10].

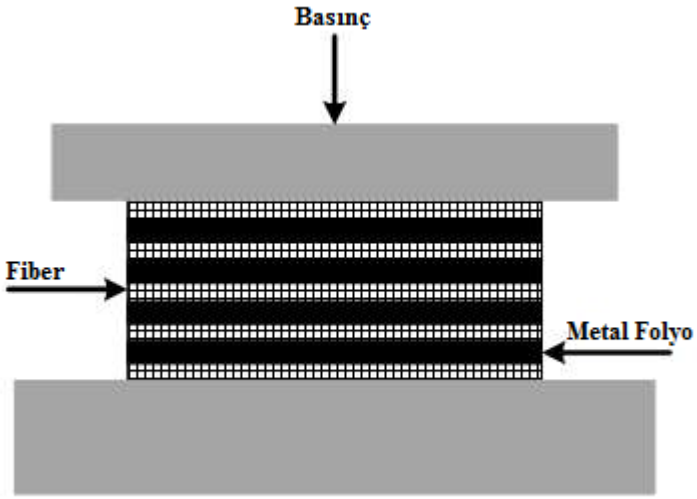


Şekil 1.6. Toz Metalurjisi Yöntemi

İkinci aşamada karışım preslenir. Presleme işlemi parçaya göre özel olarak hazırlanan çelik kalıplar ile oda sıcaklığında yapılır. Tozlar preslemeye maruz kaldıklarında basınç değerine göre gözenek miktarı değişiklik gösterebilir. Gözenek miktarını azaltmak için presleme basıncı arttırmak gerekmektedir. Gözenek miktarının artması yoğunluğu azaltmasından ötürü üretilen parçanın mukavemet değerlerine etki eder. Presleme 3 aşamadan meydana gelir. Öncelikle oluşturulan karışım kalıbın içine doldurulur. Daha sonra karışım preslenir. Son aşamaya gelindiğinde ise parça sıyırıcı yardımı ile kalıptan çıkarılır [10][11].

1.2.2.2. Difüzyon Bağı:

Bu yöntemde folyo adı verilen metal matris tabakası takviye malzeme olan elyaflar ile birleştirilerek sandviç yapı elde edilir. Bir diğer adı folyo-elyaf-folyo olarak geçmektedir. Difüzyon bağı yöntemi uygulanırken öncelikle takviye malzeme iki folyo arasına yerleştirilir. Fiber katkılı metal sandviç yapı sıkıştırılır. Folyo, matris malzeme olmasından dolayı fiberlerin bir arada tutunmasını sağlar. İşlemin devamın yapı metalin ergime noktasının üstünde bir sıcaklık değerine kadar ısıtılır.



Şekil 1.7. Difüzyon Bağı Yöntemi

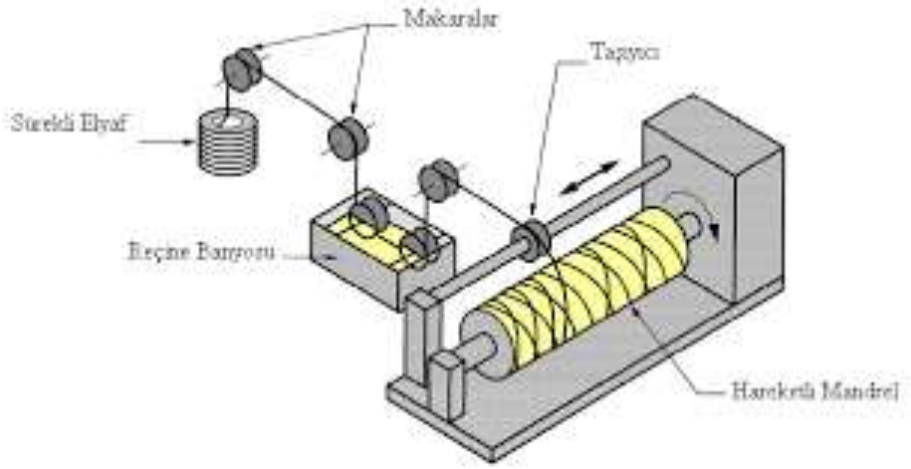
Sıkıştırma ve ısıtma etkisi ile metal folyolar ergiyerek elyaf malzemeye nüfuz ederek ıslanmasına neden olur. Sıkıştırmada oluşan basıncın etkisi ile ergimiş metal yapının her yerine yayılır. Difüzyon bağlanması vakum altında olan sistemde oluşturulacak sandviç

yapının sıcak preslenmesi neticesinde olur. Bu yöntemin birtakım dezavantajları vardır. Sıcaklığın düşük olması sonucunda fiber ve matris malzeme arasında etkileşim azalabilir. Ayrıca uygulanacak basınç liflerin yapısının bozulmasına neden olabilir. Bu nedenle bu işlem hassas parametreler ile dikkatli bir şekilde yapılabilmektedir. B, SiC, veya diğer fiber malzemeler ile takviyelendirilmiş alüminyum ve titanyum alaşımlar bu yönteme bazı örnek kompozitlerdir.

Polimer matrisli kompozitler açık ve kapalı kalıplama olarak 2 farklı yöntemle üretilir. Açık kalıplama yöntemleri:

1.2.2.3. Elyaf Sarma Yöntemi:

Elyaf sarma yönteminde sürekli elyaf lifleri, reçine dolu bir kapta geçirilerek ıslatılır. Islanan elyaf lifleri dönen başka bir makara ile çekilerek kalıp üzerine sarılır. İstenilen mekanik özelliklerde ürün elde etmek için elyaf liflerinin açılarına ve sarılma katına özen gösterilir. İstenen özelliklerde elyaf sarıldıktan sonra oluşturulan ürün sertleşir ve dönen kalıp kompozitten ayrılır. Bu yöntem genelde araba şaftları, borular ve silindirik malzemeler için uygundur [11][12][13].

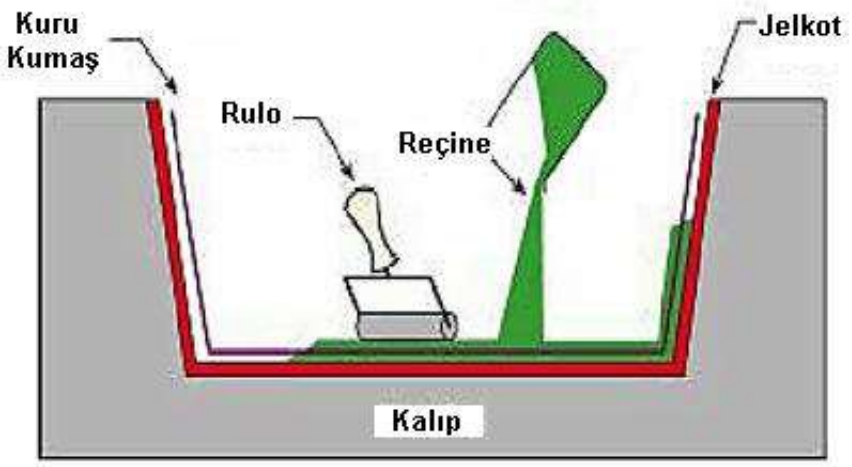


Şekil 1.8. Elyaf Sarma Yöntemi

1.2.2.4. El Yatırma Yöntemi:

Bu üretim yönteminde takviye malzemesi kalıbın üzerine el ile serilir. Üzerine rulo veya fırça yardımı ile sıvı reçine emdirilir. Bunun sonucu kalıbın şeklini alan kompozit ortaya çıkar. Üretim esnasında sıvı reçinenin takviye malzemesine iyi nüfuz etmesi

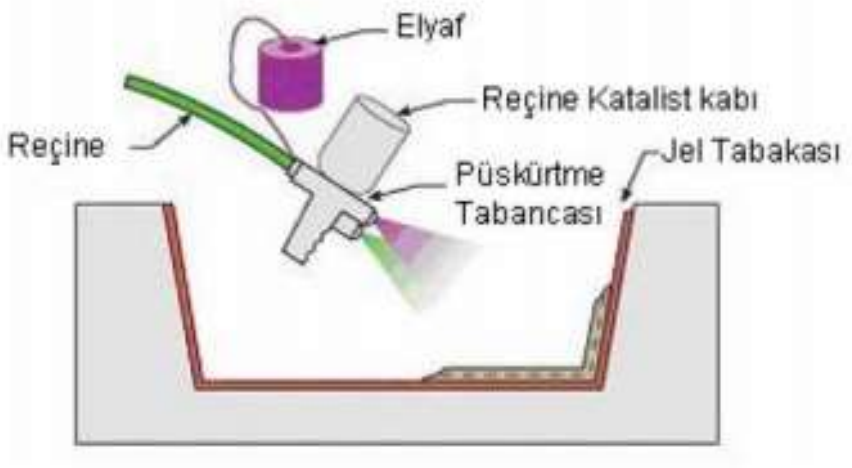
oldukça önemlidir. Bu üretim yöntemi düşük üretim maliyeti ve montaj kolaylığı sağlarken işgücü ve yetenek isteyen istemesi gibi avantaj ve dezavantaja sahiptir [13][14][15].



Şekil 1.9. El Yatırma Yöntemi

1.2.2.5. Püskürtme yöntemi:

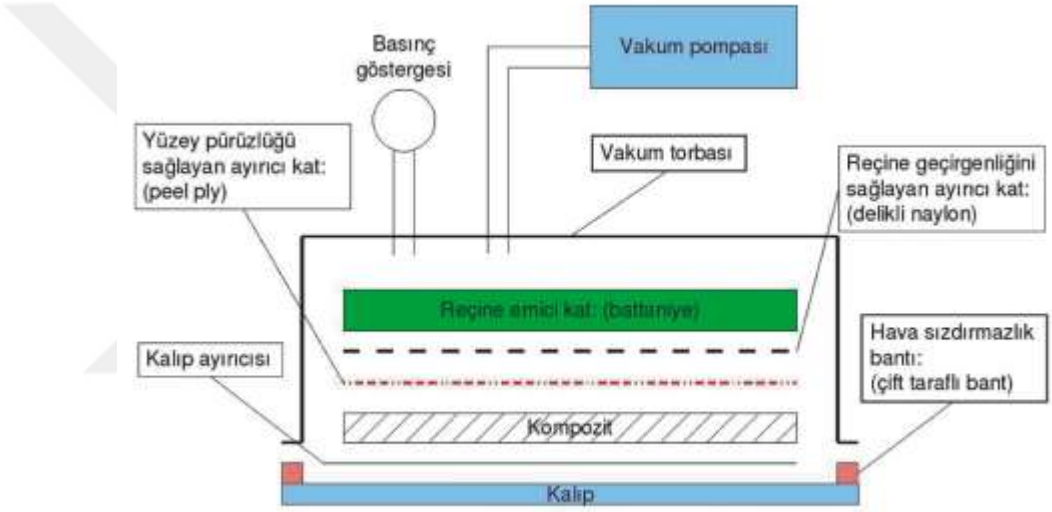
Püskürtme yöntemi el yatırma yönteminin bir püskürtme tabancası yardımı ile yapılan şeklidir. Bağımsız çalışan bir kırpıcı yardımı ile kırpılmış elyaf parçacıkları reçine ile birleştirilerek bir kalıbın üzerine püskürtülür. İstenilen püskürtme kalınlığına ulaşıldıktan sonra kürlenme işlemine geçilir. Büyük boyutlara sahip parçaların üretimi için uygundur. Ayrıca işçilikten tasarruf sağlar [15][16][17].



Şekil 1.10. Püskürtme Yöntemi

1.2.2.6. Vakumlu torbalama yöntemi:

Vakumla kompozit üretme yöntemi özellikle sandviç yapılı kompozitlerde tercih edilir. Yöntemde üretilecek kompozit daha önceden temizlenen üretimin yapılacağı yüzeye yerleştirilir. Hava sızdırmazlığını sağlamak için çift taraflı bant ile kompozitten daha büyük bir alan çevrilir. Kompozit malzemenin üzerine ayırıcı bir kat yerleştirilir. Üzerine fazla reçine emici bir kat kumaş serilir. Torbalama işlemi için naylon dikkatle yapıştırılarak içerisinden 1atm basınç çekilir. Torbanın içine reçine çekilerek vakumlamaya devam edilir. Vakum altında sertleşmeye bırakılır [18].



Şekil 1.11. Vakumlu Torbalama Yöntemi

1.2.2.7. Otoklav Yöntemi:

Otoklav yöntemi vakumlu torbalama yöntemi ile benzer olup daha gelişmiş hali olarak düşünülebilir. Bu yöntemin özelliği kürlenmenin kontrol edilerek daha kaliteli bir kompozit üretilebilmesidir. Vakum torbalama yönteminde 1atm basınca kadar olan vakumlama, otoklav yöntemi ile basınçlı bir kabın içerisine dışarıdan harici sıkıştırılmış bir gazın verilmesi ile daha yüksek basınca ulaşır. Böylece üretim esnasında basınç ve ısı kontrolü yapılabilir. Maliyetli bir yöntem olmasına karşın yüksek kalitede üretim yapılmasına olanak tanır [19][20].

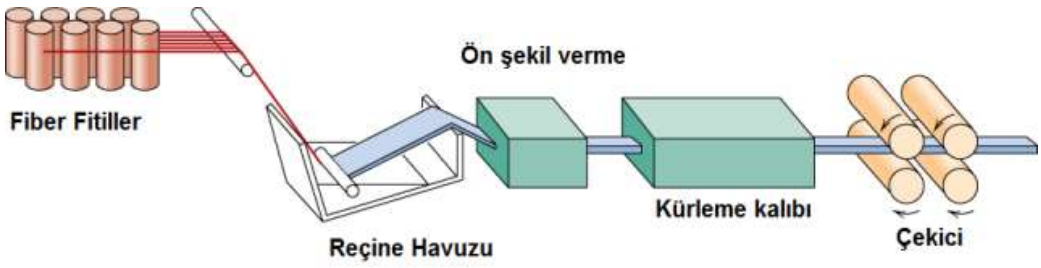


Şekil 1.12. Otoklav Yöntemi

1.2.3. Kapalı kalıplama yöntemleri

1.2.3.1. Profil çekme yöntemi (Pultruzyon):

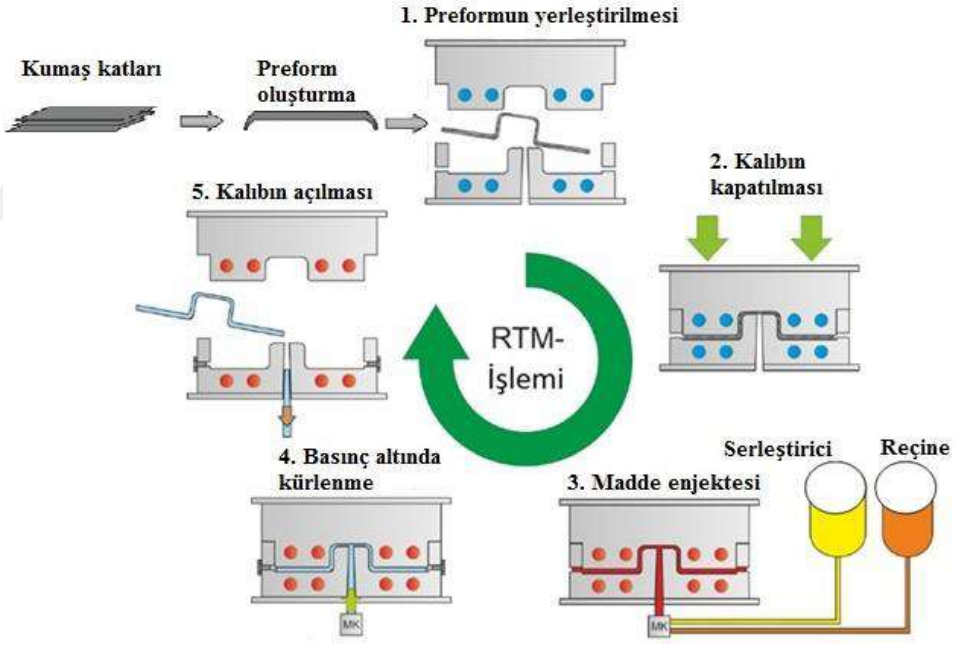
Bu yöntem ile elyaf ile takviyelendirilmiş malzeme reçine banyosundan geçirilerek ısıya kabından geçer. Elyaflar genellikle aynı yönlü olarak çekilir. Öncelikle yönlendiriciler ile form verilen elyaflar daha sonra reçine banyosuna girerek tamamen ıslatılırlar. Şekil verme kalıbından geçerek ısıtılmış pultruzyon kalıbına girer. Burada kürlenme işlemi gerçekleştirilir. Devamında ise istenen boyutlarda kesim işlemi yapılır. İşlemin sonucunda çıkan parçalar düzgün olduğu için genellikle ekstra işlem uygulanmaz. Sürekli elyaf kullanılmasının sonucunda oluşan parçanın takviye yönünde yüksek mukavemete sahip olduğu görülür. İş gücü gerektirmeyen yöntem tamamen otomatik olarak gerçekleşir [20][21].



Şekil 1.13. Profil çekme yöntemi (Pultruzyon)

1.2.3.2. Reçine Transfer Yöntemi (RTM):

1980 yıllarının ortasından itibaren kullanılan reçine transfer yöntemi, karmaşık parçaların üretimine olanak tanıdığı için otomotiv, havacılık, denizcilik alanlarında kullanımı artmıştır. Yüksek elyaf oranına olanak tanıyarak sürekli elyaf takviyeli kompozitlerin üretim yöntemidir. Üretiminde genellikle üst üste elyaf serilir. Serilen elyaf preform kalıp içerisine yerleştirilir. Üretim esnasında elyafta oluşabilecek hareketi engellemek için yapıştırıcı kullanılabilir. Üst kalıp kapatılarak sıkıştırılır. Kalıp içerisine reçine ve sertleştirici enjekte edilir. Kalıbın hava boşluklarından reçine gelene dek enjekte işlemine devam edilir. Bu noktada enjeksiyon işlemi durdurulur. Kapatılan hava boşluklarından sonra kürlenme işlemi için kalıp ısıtılarak preform basınç altında bekletilir. Oluşturulacak malzeme yeterince sertleştikten sonra kalıp açılır [22].

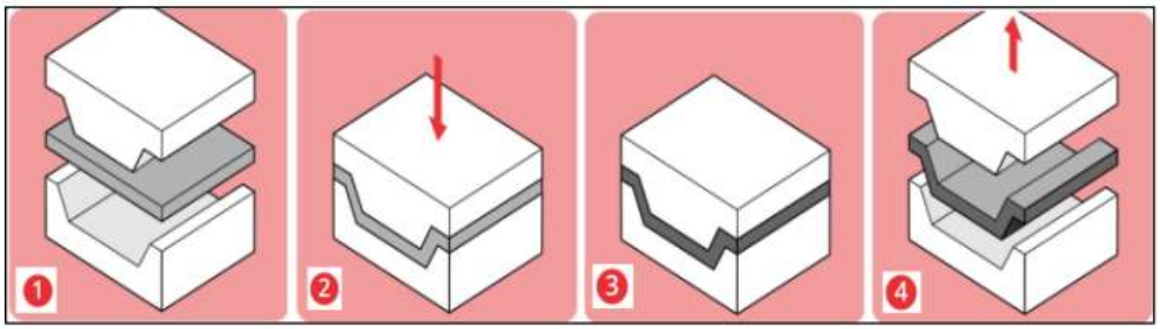


Şekil 1.14. Reçine Transfer Yöntemi (RTM)

1.2.3.3. Baskı Kalıplama Yöntemi:

Bu yöntem karmaşık parçaların seri üretimine olanak tanır. Yüksek üretim kapasitesine ihtiyaç duyulan yerlerde tercih edilir. Baskı kalıplama yönteminde hamur haline getirilen polyester, cam elyafı, dolgu ve katkı malzemelerinin karışımı hazırlanır. Hazırlanan bu karışım daha önceden ısıtılan kalıbın arasına yerleştirilerek basınç ve ısı altında şekil verilir. Bu yöntem ile üretilen parçalar RTM ve enjeksiyonlu kalıplamaya

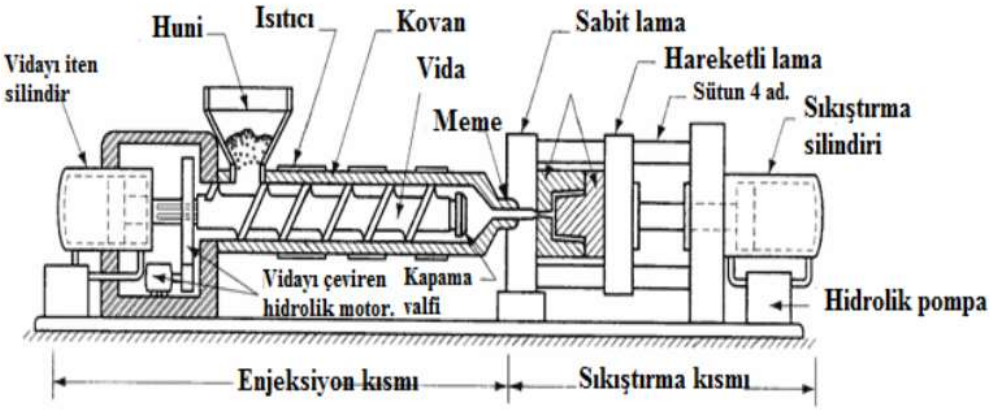
göre daha ince olmasından dolayı daha verimli kürlenmeye sahiptir. Yöntemin en önemli avantajı doğrusal olmayan kalınlıklar ile flanşların ikinci işleme gerek duyulmadan üretilebilmesidir.



Şekil 1.15. Baskı Kalıplama Yöntemi

1.2.3.4. Enjeksiyon Yöntemi:

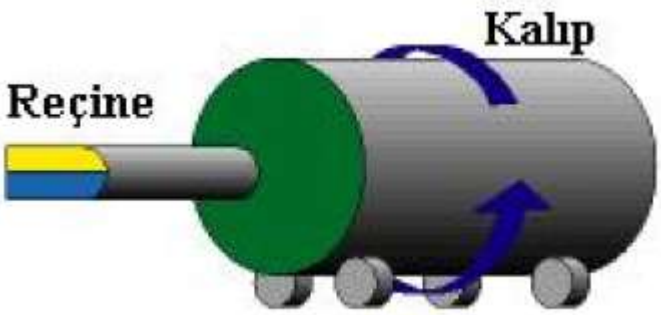
Bu yöntemin çalışma şekli ısı verilen polimerlerin yumuşaması sonucu şekil verilerek soğutulmasıdır. Termoplastik ve termostlerde başarılı bir yöntemdir. Genellikle granül ve toz halde bulunan termoplastik reçine basınç ve sıcaklık etkisi ile eritilerek sonsuz vidalı mil yardımı bir başlıktan akışa zorlanır. Kalıbın içine enjekte olan yarı akışkan reçinenin çift taraflı kalıbı doldurması sonucu yapılan üretim yöntemidir. Bu yöntem ile boru, çubuk ve plaka gibi malzemeler üretilebilir. Üretilen malzemenin uzunluğu değişken olabilir. Bu yöntem ile iki yüzü düzgün parçalar üretilir.



Şekil 1.16. Enjeksiyon Yöntemi

1.2.3.5. Savurma Döküm Yöntemi (Santifrüj):

Bu yöntem depo, tank, boru gibi silindirik malzemelerin üretimi için uygundur. İçi boş bir kalıp içerisine kırpılmış elyaf ve reçine gönderilir. İçi boş kalıba yaklaşık 900 ile 2400 rpm çevresel hız kazandırılır. Çevresel hız ile merkezcil kuvvet oluşması sağlanır. Oluşan merkezcil kuvvet elyaf parçalarını reçine ile ıslatarak kalıp yüzeyine yapışır. Kalıbın iç kısmına temas eden yüz parçanın düzgün yüzüdür. Genellikle parçanın her iki yüzü de düzgündür [23][24].



Şekil 1.17. Savurma Döküm Yöntemi (Santifrüj)

1.3 Literatür Taraması

Muhammed Abbasi ve arkadaşı [25] bu makalede farklı yoğunluğa sahip çekirdek malzemenin(köpük) katman sırasının ve yüzey kalınlıklarının, ayrıca mermi geometrisinin balistik testlere etkisini araştırmıştır. Numunelerde kullanılan metal 1,5 mm kalınlığında alüminyum 1050'dir. Poliüretan köpüğün 5 farklı çeşidi kullanılan deneyde numuneler elle yatırma yöntemi ile üretilmiştir. Balistik deney için gazlı atış silahı kullanılmıştır. Makineye yerleştirilen numunelere mermi atışı yapılmıştır. Deneysel sonuçlar incelendiğinde tek katmanlı çekirdek, 4 katmanlı farklı dizilimde olan çekirdek yapısına oranla daha yüksek balistik sınır hızına sahip olduğu görülmüştür. Çalışmanın sayısal modellemesi de yapılmıştır. Deneysel ve sayısal sonuçlar karşılaştırıldığında, iki sonucun birbiri ile uyum içersinde olduğu görülmüştür.

Matias Garcia Avila ve arkadaşları [26] çok katmanlı bir kompozite balistik test uygulamışlardır. Oluşturulan yapıda kompozit metal köpük paneller, toz metalurjisi tekniği ve çelik matris içinde 2mm çelik içi boş küreler kullanılarak üretilmiştir. İçi boş

küreler, Dresden Almanya'da bulunan Hallomet Gmbh tarafından üretilmiştir. Matris malzemede ise North American Hoganas High Alloys Llc tarafından üretilen 44 mikron parçacık boyutunda 316L paslanmaz çelik tozu kullanılmıştır. Oluşturulan yapının önüne ise bor karbür esaslı 30cm x 30 cm ölçülerinde seramik yapıştırılmıştır. Test için 7.62x51mm m80 ve 7.62x63mm m2 ap mermiler ve ABD ulusal adalet enstitüsü standartları kullanılmıştır. Çelik-çelik kompozit metal köpük yapıya 870 m/s hızında yapılan atışlar sonucunda, yapının enerji absorbe yeteneğinin 3 kattan fazla artış gösterdiği görüşmüştür.

Thiago Lara Milanezi ve arkadaşları [27] çok katmanlı zırh sistemleri (MAS) üzerine bir çalışma yapmıştır. Çalışmanın amacı kumaş olarak kullanılan rami kumaş ve aramid kumaş karşılaştırılmasıdır. Araştırmacıların yaptıkları tasarımda ilk katman olarak alümina niobia (AL203-4%Nb2O5) seramik kullanılmıştır. Ara katmanda ise %30 yoğunluklu rami lifleri ve %30 yoğunluklu aramid kumaş kullanılmıştır. Son katmanda alüminyum alaşımı(5052 H34) bulunmaktadır. 7.62x51mm M1 mühimmat ile test yapıldığına iki fiber malzemenin de benzer sonuçlar verdiğine ulaşıldı. Rami fiberlerin düşük maliyetine rağmen aramid fibere benzer sonuçlar vermiştir.

AAyush Bhat ve arkadaşları [28] literatürde yer alan çalışmaları incelemiş ve karşılaştırmışlardır. Araştırmacıların amacı fiber takviyeli polimerik kompozitler ile metalik çok katmanlı zırh sistemlerinin balistik sonuçlarını araştırmaktır. Cam-karbon kompozitlerin balistik performansı, cam-kevlar kompozitlerin balistik performansı, kumaş yapılarının balistik performansa etkileri, doğal liften imal edilmiş yapıların balistik performansa etkileri incelenmiştir. Bunlara ek olarak ara yapıya doğal liflerin eklenmesi, kesme gerilmesi altında sertleşen sıvıların kullanılması, ara yüz malzemede titanyum kullanılmasının balistik performansa etkilerini incelenmiştir. Zırh teknolojilerine de yer veren çalışmanın sonucunda çok katmanlı zırh sistemlerinde seramik kullanımının, merminin kinetik enerjisini büyük oranda emmesi, zırh sistemlerinin güvenliğini arttırdığı, kompozit yapılarda veya çok katmanlı zırh sistemlerinde doğal liflerin kullanılmasının üretim sürecindeki maliyetleri önemli oranda azalttığı ve eklemeli imalat sistemlerinin gövde zırhlarında kullanılabileceğine ulaşılmıştır.

Wei Zhang ve arkadaşları [29] yaptıkları çalışmada karbon fiber takviyeli plastiklerin, yüksek hızlı eğik ve normal atışların balistik etkilerini incelemişlerdir. Numunede 16 katlı yarı izotropik prepreg kullanılmıştır. 100 mm'den kesilmiş kare

numune 2mm kalınlığındadır. Numune 3mm kalınlığında 2 çelik arasına yerleştirilmiştir. Bu test için nitrojen gazı kullanan gazlı bir atıcı kullanılmıştır. 7.62 mm kalibrelik mermi zırhlı bir odacığa gönderilmiştir. Numunede meydana gelen darbeyi kayıt altına almak için 320x192 piksel çözünürlüğünde kamera ve 1300 watt gücünde led ışık kullanılmıştır. Mermiler 0, 30 ve 45 derecelik açılar ile numuneye gönderilmiştir. Test sonucunda oluşan hasar desenleri normal darbe ve eğik darbede farklıdır. Eğik atış ile yapılan darbede mermiye temas eden alan daha fazla ve oluşan kraterde her iki tarafta fiber kırılmalar meydana gelmiştir. Normal atış ile yapılan darbede numune yüzeyinde fiber kırılmalar oluşmuştur. Mermi girişinden sonra üst katmanların gevşemesinden dolayı herhangi bir krater görülmemiştir. Ayrıca balistik sınırın altında normal darbeler eğik darbelerden daha yüksek hasara neden olurken, balistik sınırın üstünde tam tersi bir sonuçla karşılaşılmıştır. Verilen en yüksek hasar balistik sınıra yakın hızlarda eğik atış ile gerçekleşmiştir.

Muslim Ansari ve arkadaşları [30] yaptıkları çalışmada cam elyaf takviyeli kompozit malzemelerin, 19 mm çapında ve konik uçlu çelik mermiler karşısında balistik performansını incelemiştir. Testin sonlu elemanlar yöntemi ile modellemesi yapılarak doğrusal olmayan malzeme davranış ve farklı başarısızlıklar incelenmiştir. Modelde yapılan hedefin enerji sönümleme kapasitesi, balistik sınır hızına ulaşıldığında değişen hedef kalınlığı ve en boy oranı tartışılmıştır. Çalışmada çeşitli ebatlarda 3,1 mm ve 6,2 mm ölçüsünde cam elyaf takviyeli kompozit modellenmiştir. Modelleme için Ansys/Autodyn 14.5 kullanılmış ve model 19 mm çapında 60 adet konik uca sahip mermi darbesine maruz bırakılmıştır. Numune üretiminde ise 0/90 yönlendirmesine sahip cam elyaf kullanılmıştır. Elle yatırma yöntemi ile üretilen numune 80 santigrat derece sıcaklıkta 3 saat boyunca fırında kürlenmiştir. Darbe testlerinin yapımında kompresör ile basınçlandırılmış pnömatik tabanca kullanılmıştır. Görüntülemeler için Phantom v411 yüksek hızlı görüntü kamerası kullanılmıştır. Sonuçlar incelendiğinde en boy oranının artmasının kompozit malzemenin balistik performansını arttırdığı, oran etkisinin kalın hedefte belirginliğini arttırdığı, ayrıca en boy oranının artması ile numunenin enerji sönümleme kapasitesinin arttığı sonucuna ulaşılmıştır. Buna ek olarak balistik direncin en boy oranı ile beraber arttığı sonuçları elde edilmiştir.

Yasin Musa Uçak [31] yaptığı tez çalışmasında nano parçacıklı katkı malzemelerini, belirli ağırlık oranında epoksi ile karıştırarak kompozit malzeme içerisinde yer alan matrise ilave etmiştir. Matrisin güçlenerek malzeme mukavemetini

arttırması amaçlanmıştır. Çalışmada nano parçacıklı ve parçacık ilavesi olmayan 2 numune üretilmiştir. Üretilen numuneler eksenel çekme testine maruz bırakılmıştır. Numune üretiminde 300 mm x 300 mm ölçülerinde 7 kat karbon elyafı [0° / +45° / -45° / 0° / -45° / +45° / 0°] kullanılmıştır. Fırında 80 dereceye ısıtılmış epoksi ve sertleştirici kullanılarak elle yatırma yöntemi ile üretim yapılmıştır. Nano parçacıklı katkı malzemesi olarak çok duvarlı karbon nano tüp, SiC, NiO ve nano kil kullanılmıştır. Nano parçacıklar Hielscher UP400S marka ultrasonik karıştırıcı yardımı ile karıştırılarak karbon elyaflara uygulanmıştır. Ortaya çıkan ısınma ve epokside oluşacak sertleşmeyi engellemek için Labo CH750 marka soğutucu makine kullanılmıştır. Plakalar 6-7 bar basınç altında 135 derece sıcaklık ile presleme yapılmış ve 2-3 saat basınca maruz bırakılarak üretilmiştir. 2.25 mm kalınlığında 250 mm x 15 mm ölçülerinde deney numuneleri kesilerek eksenel çekme testi uygulanmıştır. Sonuçlar elektron mikroskobu ile görüntülenmiştir. Parçacık katkısı olmayan numuneler ile karşılaştırıldığında çok duvarlı karbon nano tüp ve nikel oksit katkısı kopma dayanımında önemli bir artışa neden olurken silisyum karbür katkısı azalmaya neden olmuştur. Çok duvarlı karbon nano tüp, karbon elyaf kompozit malzemenin üzerinde mukavemet arttırma özelliği gösterirken, silisyum karbürün kopma dayanımını azaltarak malzemeyi gevrekleştirdiği görülmüştür. Nano kil ise mukavemeti bir miktar arttırmıştır. Nikel oksit parçacık katkısının parçacıklara oranla daha yüksek mukavemet özelliği gösterdiği sonucuna ulaşılmıştır.

Burak Kıyak [32] yaptığı tez çalışmasında karbon fiber ile takviyelendirilmiş, farklı yapı ve yükseklikte sandviç kompozitler üretmiştir. Üretilen numuneler eğme ve basma testine maruz bırakılarak sonuçlar değerlendirilmiştir. Dikdörtgen, kare, üçgen, delikli tip, köpüklü ve köpüksüz çekirdek yapıları kullanılmıştır. Karbon fiber kompozit, testere yardımı ile belirli ölçülerde kanal aralıkları açılarak çekirdek malzemeye dönüştürülmüştür. 10 farklı tipte numune üretilmiş ve test edilmiştir. Kare kesitli üretilen numunenin basma gerilmesi dikdörtgen kesitli ile benzer sonuç verirken eğilme dayanımı daha düşüktür. Üçgen kesitli numunenin basma dayanımı kare ile yakınken dikdörtgen yapıdan daha düşük çıkmıştır. Eğme dayanımı ise kare kesitli numuneden yüksektir. Poliüretan köpük ile dolduruşmuş hücrelerin malzemeye absorbe yeteneği kazandırdığı sonucuna ulaşılmıştır. Delikli yapı ise yoğunluğu düşürürken yığılma gerilmelerine neden olmuştur. Hücre yapısının eğilme gerilmesinde önemli bir parametre olduğu, poliüretan köpük dolgusunun basma ve eğilme gerilmelerini

arttırmazken yük altında absorbe ettiği, hücre yüksekliğinin artmasının basma gerilmesini azaltırken eğilme gerilmesini arttırdığı, hücre yoğunluğunun artmasının basma ve eğilme gerilmelerini arttırdığı sonuçlarına ulaşılmıştır.

Emrah Temel ve arkadaşları [33] balistik koruma amacıyla kullanılan tekstil malzemelerinin özellikleri ve balistik testleri üzerine çalışma yapmışlardır. Literatürde yer alan çalışmaları bir araya getirerek kullanılan tekstil ürünleri hakkında bilgiler vermişlerdir. Dünyada yer alan balistik standartlar ve test tipleri, mermi çeşitleri ve balistik test düzeneği hakkında bilgi vermişleridir. Sonuç olarak kullanılan malzemelerin lif tipinin yanı sıra kullanılan reçinenin tipi, kumaş doku tipi, kullanılan kat sayısı ve sıklığının balistik performans üzerine önemli etkisi bulunmaktadır. Bunlara ek olarak yapılan testlerin matematiksel modellenmesi ile mermi geometrisinin, zırh katman yapılarının ve kumaşın özelliklerinin balistik performansa etkileri bilgisayar ortamında görüntülenebilmekte ve araştırılabilmektedir.

Chengjun Liu ve arkadaşları [34] yaptıkları çalışmada fiber metal laminat ve köpük çekirdekli yapılmış sandviç yapının, yüksek hızlı darbe testlerini yapmışlardır. Numune 120 mm x 120 mm ölçüsünde ve değişen kalınlıklardadır. Fiber metal laminatlar oluşturulurken dış yüzeyde 1mm kalınlığında 5005 serisi alüminyum kullanılmıştır. Cam elyaf kompozitler (0-90 derece dizilimli) kullanılmıştır. Metal çekirdek olarak alüminyum köpüğü kullanılmıştır. Köpükler 20 mm, 25 mm, 30 mm kalınlıklarında ve 300 kg/m3 yoğunluğa sahiptir. Üçer adet numune üretilmiştir. Deney için havalı silah sistemi kullanılmış olup, mermi olarak bilye tercih edilmiştir. Deneyin sonucunda fiber metal laminat yapısında yer alan kaplama kalınlığının enerji absorbe etmesinin büyük ölçüde iyileşebileceği, fiber metal laminatın kalınlığının artması ile üst ve altta yer alan FML'lerde daha uzun delaminasyona sahip olduğu ve ayrılma aralıklarının olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Bunlara ek olarak metal köpük çekirdeğin kalınlığının artması ile üstte yer alan FML ile AL köpük çekirdek arasında bağ koması ortadan kalktığı görülmüştür. Çalışma sonlu elemanlar metodu ile modellenmiş ve sonuçlar deneysel sonuçlar ile doğrulanmıştır.

A. Seyed Yaghoubi ve arkadaşı [35] bu çalışmada GLARE 5 fiber metal lamine kirişlerin, balistik darbe karşısında kalınlığın etkisini araştırmışlardır. Deney için numuneler oluşturulurken 2024-T3 alüminyum alaşımı, [0/90] yönlü cam elyafı ile kullanılmıştır. 254 mm x 25,4 mm ölçülerinde kesilen numunelere farklı hızlarda gazlı atış silahı ile atış yapılmış ve atışlar yüksek hızlı kamera ile görüntülenmiştir. Deneysel

sonuçlar fiber metal laminat kirişlerde enerjinin dağıtılmasının başlıca nedeni alüminyum tabakalarının bükülmesi ve ara yüzey bağlarının ayrılması olduğunu göstermektedir. Ayrıca oluşturulan kompozit malzemenin kalınlığı arttıkça balistik sınır hızının parabolik olarak arttığı gözlenmiştir. Çalışmanın sayısal modellemesi de yapılmıştır. Deneysel ve sayısal modeller örtüşmektedir.

Chengjun Liu ve arkadaşları [36] bu çalışmada fiber metal laminat ile yapılmış alüminyum köpük çekirdeğine sahip sandviç panellerin darbe davranışlarını incelemişlerdir. Çalışmada 150 mm x 150 mm ölçülerinde ve çeşitli kalınlıklara sahip numuneler üretilmiştir. Alüminyum tabakalar prepreg cam elyafları [0-90] ile fiber metale dönüştürülmüştür. Çekirdek malzeme olarak 20 mm kalınlığında, 300kg/m3 yoğunluğa sahip alüminyum köpük malzeme tercih edilmiştir. Oluşturulan numuneler dinamik darbe laboratuarında test edilmiştir. Test için elektromanyetik kontrollü ağırlık darbe makinesi kullanılmıştır. Düşük hızda yapılan testin sonuçları incelendiğinde oluşturulan sandviç panelde yer alan köpük malzemesinin kalınlığındaki artış, enerji absorbe yeteneğinde küçük bir artışa neden olabileceği belirlenmiştir. Bunun yanı sıra fiber metal laminatlarda yer alan katman kalınlığı enerji absorbe yeteneğini büyük oranda arttırabileceği sonucuna ulaşılmıştır. Deneyin sayısal modellemesini barındıran çalışmada deneysel ve sayısal sonuçların örtüştüğü gözlemlenmiştir.

P. Mohammadkhani ve arkadaşları [37] bu çalışmada sandviç panelli kompozit malzemelerde çelik tel takviyeli poliüretan köpük malzeme kullanılmasının, düşük hızlı darbelere etkisini araştırmışlardır. Numune yapımında 3 kattan oluşan 200 g/m2 sahip cam elyafı kullanılmıştır. Elyaf, epoksi ve reçine ile birleştirilmiştir. Çekirdek malzeme olarak 160 kg/m3 yoğunluğa sahip poliüretan köpük malzeme ve üzerine farklı desen diziliminde, 0,8 mm çapında çelik tel malzeme kullanılmıştır. Oluşturulan kompozit malzemenin mekanik performansını görüntülemek için düşük hızlı darbe testi uygulanmıştır. Test, 356 mm mesafeden serbest bırakılan 16 mm çapında yarım küreli çelik mermi ile yapılmıştır. Sonuçlar incelendiğin paslanmaz çelik tellerinin kullanımı darbe davranışlarında olumlu sonuçlar vermiştir. Çelik tellerin düşük hızlı darbe performansını arttırması, uygun maliyet sebebi ile endüstride uygulanabileceği sonucuna ulaşılmıştır. Sandviç paneller için özellikleri en iyi seviyeye çıkaran modelin yıldız düzeninde yerleştirilen teller olduğu görülmüştür. Çelik tel kullanımının kompozit laminatların esnekliğini azaltırken panelleri sertleştirdiği ve yıldız düzeni ile

ağırlık %10 artarken enerji absorbe yeteneğinin 2 katından fazla artabileceği sonucuna ulaşılmıştır. Deneyin sayısal modellemesi yapılarak deneysel sonuçlar desteklenmiştir.

Ertan Kösedağ [38] bu çalışmada fiber metal laminat yapılı kompozitlerde farklı dizilim ve kalınlığın balistik etkilerini incelemiştir. Çalışmada 4 farklı yapıda kompozit malzeme yapılmıştır. Tüm numunelerin toplam kalınlıkları aynı iken katman, dizilim ve kalınlıkları farklıdır. Numune üretiminde aramid prepreg ve Al 6061 T6 alüminyum plaka kullanılmıştır. Numuneler 100 mm x 100 mm ölçülerinde ve toplam 12 mm kalınlığa sahiptir. Dizilim olarak ortasında 3mm alüminyum alt üst tabakada aramid bulunan laminat (F2A1), ortasında aramid kumaş ve alt üst tabakada 3mm alüminyum kullanılan laminat (A2F1), ortasında 2 adet 1,5 mm kalınlığa sahip alüminyum bulunan laminat (F3A2) ve alt üst katmanda 1,5 mm alüminyum bulunan laminat (A4F3) yapı kullanılmıştır. Balistik test için tek kademeye sahip gazlı atış silahı kullanılarak 300 m/s ve 500 m/s hızlarında FSP mermi atışı yapılmıştır. Atışlar yüksek hızlı kameralar ile kayıt altına alınarak incelenmiştir. Sonuçlara bakıldığı zaman ilk katmanda metal kullanımının balistik darbe direncini önemli oranda arttırdığı görülmüştür. Metal kalınlığı ve miktarı arttıkça balistik dayanım artmaktadır. Bunun sonucunda darbe dayanımı en yüksek numune A2F1 olurken en düşük numune F3A2 olmuştur.

Umut Çalışkan ve arkadaşı [39] bu çalışmada köpük çekirdekli (polivinilklorür) ve karbon fiber takviyeli sandviç yapıların, eğilme etkisine gösterdiği tepkiyi incelemişlerdir. Test numunesinde 2 farklı kalınlık ve farklı lif açılarına sahip karbon fiber kullanılmıştır. Numunenin üretilmesinde 300 kg/m3 yoğunluğa sahip karbon kumaş kullanılmıştır. Vakumlu reçine infüzyonu ile üretilen numuneler 1 mm dört kat kumaş ve 2 mm sekiz kat kumaştan meydana gelmiştir. [0, 45, 90] açılarında liflere sahip fiberler 200 mm x 30 mm ölçülerinde kesilmiştir. Çekirdek malzeme olarak 200 mm x 30 mm ölçülerinde, 10mm ve 20 mm kalınlıkta, 130 kg/m3 yoğunluğa sahip AIREX C70 polivinilklorür köpük kullanılmıştır. Araldite 2015 yapıştırıcı ile kompozit birleştirilerek teste hazırlanmıştır. Numuneye uygulanan eğilme darbe testinde Fractovis Plus düşük hızda darbe cihazı kullanılmıştır. Tomografi görüntüleri alınan testin sonuçları incelendiğinde, darbe enerjisinin artmasının 0 derece lif açılı kirişlerde temas kuvvetini arttırırken 45 ve 90 dereceli kirişler arasında farkın az olduğu görülmüştür. 0 dereceli lif açılarına sahip kompozit kiriş zarar görmezken 45 derece lifli kompozit 20J, 90 derece lifli kompozit ise 5J darbe enerjisi ile zarar görmüştür. Kullanılan karbon fiber kalınlığı 1mm den 2 mm ye çıkarıldığında temas kuvvetinin seviyesi artmıştır.

Buna ek çalışmanın sayısal modellemesi yapılmış ve sonuçları deneysel sonuçları desteklemiştir.

Yongjie Zhang ve arkadaşları [40] bor karbürden imal edilen hafif kompozit zırhın balistik analizini yapmışlardır. Test için ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen (UHMW-PE) malzemeye bor karbür eklenerek (B4C/ UHMW-PE) 1. Numune, bor karbür ve karbon eklenerek (B4C/C/ UHMW-PE) 2. Numune yapılmıştır. 200 mm x 200 mm x 10mm ölçülerinde numunelere 13 mm çapında 64 mm uzunluğunda 4340H çelikten imal edilmiş 12,7 mm API mermisi ile atış yapılmıştır. Sonuçlar incelendiğinde B4C/UHMW-PE kompozit zırhların mermilerin penetrasyonu sonucu delindiği görülmüştür. B4C/C/UHMW-PE kompozit zırhları ise mermilerin penetrasyonu sonucunda mermiyi tutarak delinmediği görüşmüştür. Deneyin sayısal modellemesi AUTODYN programı ile yapılarak bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Sonuçlar karşılaştırıldığında hata ortanın %8,5 olduğu görülmüştür.

Pengcheng Hu ve arkadaşları [41] Metal/ UHMW-PE/ SiC çok katmanlı kompozit zırhın düz burunlu mermi çekirdeği karşısında balistik performansını incelemişlerdir. İki metalik levha arasına yerleştirilen hibrit yapılı kompozit malzemede çekirdek malzeme olarak UHMW-PE/SiC kullanılarak çok katmanlı yapı elde edilmiştir. Numunede farklı kalınlıklar kullanılarak 480 mm x 480 mm x 97 mm ölçülerinde imal edilmiştir. İlk katmanda 5 mm kalınlığında yüksek mukavemetli çelik malzeme yer almaktadır. Arkasında 20 mm kalınlığında aerojel malzeme, 10 mm silisyum karbür seramik, 21 mm UHMW-PE laminat, 11 mm UHMW-PE laminat, 20 mm kalınlığında aerojel malzeme, 10 mm kalınlığında yüksek mukavemetli çelik malzeme yer almaktadır. Oluşturulan numuneye balistik deney silahı ile 12,8 mm çapında 35CrMnSiA çelik mermi ile atış yapılmıştır. Mermi penetrasyonu Phantom v310 yüksek hızlı kamera ile kayıt altına alınmıştır. Sonuçlar incelendiğinde metal yüzeylerin sünek delik büyütmesinde başarısız olduğu, seramik tabakalarda radyal yönlü çatlak eğilimleri olduğu, ince UHMW-PE laminat büyük şişkin deformasyona uğradığı görülmüştür. Buna ek olarak seramik tabakanın en ön yüze konumlandırılmasının artık hızı azaltarak oluşturulan kompozit zırhın enerji absorbe yeteneğini arttıracağı görülmüştür.

Serhat Şanlıtürk [42] alüminyum katmanlar kullanarak üretilen fiber metal laminatların delinmesinin araştırılması çalışmasını yapmıştır. Bu çalışmada 0-90 derece açılarına sahip fiberli cam epoksi prepregler, alüminyum alaşımlı metal plakaların arasına yerleştirilmiştir. Sıcak presleme ile üretilen kompozit toplam 9 katmandan

oluşmaktadır. Deney numunesi, her biri 0,5 mm kalınlıktan oluşan 5 katman alüminyum 7075 levha, 4 katmanı e tipi cam fiber prepregten oluşturulmuştur. Üretilen numuneye öncelikle çekme dayanım testi uygulanmıştır. Daha sonra delinme için 3 çeşit (Sert Karbür, HSS ve TiN kaplı HSS) kesici uç seçilmiştir. Testler 1000, 2000 ve 3000 dev/dk dönme devri ile 0.05, 0.10, 0.15 mm/dev ilerleme hızlarında yapılmıştır. Kullanılan her takım ile 9 adet, toplamda 27 adet delme işlemi yapılmıştır. Testin gerçekleştirilmesinde Brother marka Speedio S500X1 model CNC dik işlemeli tezgah kullanılmıştır. Kesme kuvveti ve moment ölçümü için Kistler marka 9257B model dinamometre kullanılmıştır. Numunelerde oluşan çapak yüksekliklerinin ölçümü için Nikon marka Epiphot 200 model optik bir mikroskop kullanılmıştır. Sonuçlar incelendiğinde delme ucunun ilerleme hızı, dönme devri ve çeşidi numunede oluşan kesme kuvvetini önemli ölçüde etkilemiştir. Milin dönme devri ile kesme kuvveti arasında doğru orantı olduğu görülmüştür. HSS kesici takım en yüksek kesme kuvvetine, sert karbür en düşük kesme kuvvetine sahiptir. Çap sapması ve delik çapının milin dönme devri ve ilerleme hızı ile doğrudan bağlantılı olduğu, devir artışında delik çapında oluşan sapmanın azaldığı, ilerleme hızının artmasında delik çapının doğru orantılı olarak arttığı görülmüştür. HSS takımlar ile çap sapması yüksek iken sert karbür takımlarda düşük olduğu görülmüştür. Bunlara ek olarak mil devrinin ve ilerleme hızının artması çapak yüksekliğini arttırmıştır. Sert karbür takımlar ile daha düşük çapak yüksekliği görülmüştür.

Erdal Camcı ve arkadaşları [43] bu çalışmada metal içerikli sandviç kompozit yapıların balistik etkiler karşısındaki performansını incelemiştir. Çalışmada vücut koruma ve zırh sistemlerinde ağırlık azaltılırken deformasyon özelliklerini arttırmaya yönelik yapılan literatür çalışmalar incelenmiş ve özetlenmiştir. Zırh yapımında kullanılabilecek kompozit yapıların çeşitlerine yer verilmiştir. Deneysel metotlara yer verilen çalışmada test prosedürleri hakkında bilgiler verilmiştir. Bunlara ek olarak sayısal modelleme ve nümerik analizlere değinilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde malzemelerde darbe anında enerji emilmesi, malzemenin içyapısı ile doğrudan ilgili olduğu görülmüştür. Ayrıca kırılma özellikleri malzeme sünekliğine bağlıdır. Oluşturulan kompozit, seramik ve metal içerikli ise seramik yapı merminin deformasyonuna uğrar. Metalde ise keskin bir koni oluşturur. Bu sayede merminin enerjisi emilir. Ayrıca balistik deneylerde çelik malzemelerin kalınlığı ve mekanik

özellikleri (sertlik, kırılganlık, tokluk) arttıkça balistik özellikleri doğru orantılı olarak arttığı sonuçlarına ulaşılmıştır.

Orhan Gülcan ve arkadaşları [44] fiber metal laminat kompozitlerin uçak sanayisinde kullanımını incelemiştir. Çalışmada fiber metal laminat yapılı kompozitlerin çeşitlerine ve mekanik özelliklerine yer verilmiştir. Ayrıca FML üretimi olan parçaların hangi firma tarafından uçağın neresinde kullanıldığı hakkında bilgiler verilmiştir. Korozyon ve yanma direnci incelenen laminatların havacılık sanayisine katkı sağlayacağı düşünülmektedir. Sonuçlar incelendiğinde FML üretiminde reçine ve metalin cinsi, fiber dizilim sırası gibi parametrelerin deney sonuçlarına etkisinin literatürde eksik olduğu görülmüştür. Düşük hızlı darbe testlerinde sıcaklık etkisi, buna ek olarak FML üretiminde termoplastik ve termosetlerin etkisini içeren çalışma sayısının az olduğu görülmüştür. Şekil hafızalı metallerin kullanılması ile ilgili literatürde yapılan çalışmanın yok denecek kadar az miktarda olduğuna değinilmiştir.

Sefa Emin Gültekin [1] yaptığı tez çalışmasında balistik zırhlar için kompozit malzeme varyasyonlarını incelemiştir. Çalışmada kişisel koruma için yapılan zırh numunelerinin tabaka ve kumaş dizilimlerinin balistik etkileri üzerinde durulmuştur. Numunelerde ilk etapta polipropilen bal peteği, kevlar, kontrplak kullanılarak farklı dizilim ve kombinasyonlar ile ilk kademede 6 adet kompozit malzeme üretilmiştir. Numune ölçüsü 200 mm x 200 mm x 40 mm'dir. Daha sonrasında ilk kademeden elde edilen veriler ile polipropilen bal peteği, çelik tel, kevlar, karbon fiber kullanılarak aynı ölçülerde ikinci kademe 12 adet kompozit malzeme üretilmiştir. Oluşturulan numunelere Safir T14 uzun namlulu tüfek ile atış yapılmıştır. Deneyde 36 kalibre tek çekirdekli mermi kullanılmıştır. Sonuçlar incelendiğin ilk kademe numuneler için 2 adet kompozit yapı mermiyi durdurabilmiştir. Kevlar, kontrplak, polipropilen bal peteği dizilimli kompozit ve polipropilen bal peteği, kontrplak, kevlar dizilimli kompozit başarılı numunelerdir. İkinci kademe numuneleri incelendiğinde 2 adet kompozit yapı mermi tutmuş ve başarılı olmuştur. Karbon fiber, polipropilen bal peteği, çelik tel dizilimli kompozit ve karbon fiber, polipropilen bal peteği(x2), çelik tel dizilimli kompozit mermiyi tutmuş ve balistik koruma limitinin altında kalan arka yüzey çıkıntısı ile başarılı olmuşlardır. Yapılacak kompozit malzemede merminin temas edeceği ilk yüzeye sert malzeme konularak enerjinin absorbe edilmesi, sert katmanın arkasına yumuşak katman eklenerek şok dalgasının sönümlenmesi, son tabakada destekleyici

katman kullanılması gerektiği sonucuna ulaşılmıştır. Deneyin sayısal modellemesi yapılarak deneysel sonuçlar ile karşılaştırıldığında sonuçlar örtüşmüştür.

L. Peng ve arkadaşları [45] hibrit kompozit laminat yapıların balistik testler karşısında verdiği tepkileri araştırmışlardır. Zırh sistemlerinin balistik etkilere dayanımını arttırmayı amaçlamışlardır. Dayanımı arttırmak için kompozit yapısında kevlar, sıkıştırılmış ahşap, seramik, Dyneema kombinasyonlarını kullanmışlardır. Toplamda 25 adet numune üretilerek 806,0 m/s ve 887,5 m/s hızlarında 7.62 mm mermi ile atış yapılmıştır. Numune üretiminde farklı dizilimlere sahip seramik + elyaf takviyesi + malzeme, seramik + ince sıkıştırılmış ahşap + elyaf takviyesi + malzeme, kalın sıkıştırılmış ahşap + ince sıkıştırılmış ahşap + elyaf takviyesi + malzeme, kalın sıkıştırılmış ahşap + elyaf takviyesi + malzeme, sıkıştırılmış ahşap + çift seramik + elyaf takviyesi + malzeme, tek plakalı seramik + elyaf takviye malzemesi veya sıkıştırılmış ahşap kullanılmıştır. Oluşturulan numuneler 100 mm x 100 mm x 5 mm ölçülerine sahiptir. Test için 7.62 mm mermi kullanan balistik tüfek kullanılmıştır. Numunede oluşan deformasyonu kaydetmek için Phantom v2640 yüksek hızlı kamera kullanılmıştır. Deney sonuçları incelendiğinde Dyneema ve kevlar iyi balistik etki sunarken sıkıştırılmış ahşap hafif olmasına karşın enerji emilimi çok zayıf kalmıştır. Buna ek olarak Dyneema (B4C) kompozit panel en düşük kalınlık ve en yüksek yoğunluğa sahip olması ile en yüksek balistik performansı sergileyen kompozit yapı olmuştur.

J. Pach ve arkadaşları [46] yapılan çalışmada polimer esaslı kompozit malzemelerin balistik direnci analiz edilmiştir. Deneyde 4 farklı kalınlık ve özellikte hibrit kompozit kullanılmıştır. Tabaka olarak tungsten karbür kullanılmıştır. Alüminyum oksit (Al2O3) seramik bilyeler ile çelik (100Cr6) bilyeler kullanılarak polimer matrise gömülmüştür. Stiren bütadien kauçuk ve aramid kumaşın kullanıldığı hibrit kompozit malzemede 100 mm x 100 mm ölçüde numuneler üretilerek balistik test yapılmıştır. Balistik atışlar 5,56 mm x 45 mm mermi kapasiteli Beryl tüfeği ile 10 metre mesafeden yapılmıştır. Atış hızını ölçmek için Doppler Waibel SL-525P hız radarı kullanılmıştır. Tarama mikroskobu ile elde edilen görüntüler incelendiğinde mermi hızında gözlemlenen en büyük düşüş (%47) tungsten karbür içeren plaka olmuştur. Al2O3 esaslı seramik kalkan ise mermide %30 hız düşüşü sağlamıştır. Bu değer çelik bilyeli kompozit için %17'de kalmıştır. Kauçuk ve aramid esaslı kompozit ise

mermilerin enerjisini absorbe edemediği için uygun bir birleşim olmadığı görülmüştür. Deneyin sayısal modellemesi yapılmış olup deneysel sonuçlar ile örtüşme sağlanmıştır.

Saurabh Rathod ve arkadaşları [47] bu çalışmada metal seramik kompozit yapıların balistik performansını incelemişlerdir. LS-DYNA programı üzerinden kompozit malzeme modellenerek literatürde yer alan deneysel çalışmalar ile doğrulanmıştır. Analiz aşamasında alüminyum levha ile desteklenmiş alümina ve bor karbür seramik yapılarından 2 adet kompozit oluşturulmuştur. Oluşturulan malzemeye silindirik yapılı tungsten mermi ile atış yapılmıştır. 7,62 mm çapında ve 76,2 mm uzunluğunda mermi, kompozit malzemenin merkezine 1550 m/s hızla atılmıştır. Bor karbür ve alüminyum ile oluşturulan kompozitin mermiye direnme verimi, alümina ve alüminyumdan oluşturulan kompozite göre daha fazladır. Ayrıca penetrasyon derinliği de daha düşüktür. Bor karbür içeren kompozitin balistik limiti daha yüksek çıkmıştır. Bunlara ek olarak bir zırhta balistik direnci arttırmanın yolu, ön yüze gelen katmana bor karbür, arka yüze gelen katmana alüminyum alaşımı olduğu görülmüştür.

Manoj Mehera ve arkadaşları [48] gelişmiş zırh malzemelerinin performansını değerlendirmişlerdir. Çalışmada mükemmel çekme değerine sahip kompozit yapmak için lifli yapının birkaç katmandan oluşumunun, kompozit zırh yapımı için en iyi malzeme seçimi olduğuna değinilmiştir. Seramik, metal ve alaşım esaslı kompozit zırh malzemeleri hakkında bilgi verilen çalışmada sayısal simülasyonlara da değinilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde gelişen silah sistemlerine karşın savunma amaçlı koruyucu zırh malzemelerinin daha çok geliştirilmesi gerektiği vurgulanmıştır. Polimer esaslı malzemeler düşük ağırlığa ve hareketli bir yapıya sahip olmasına karşın; seramik ve metal malzemeler sertlik, yüksek mukavemet, darbe dayanım özellikleri daha yüksektir. Bu nedenle kompozit zırh yapısı delinmeye karşı daha yüksek direnç gösterirken merminin enerjisini absorbe edebilir ve dağıtabilir.

Murat Aydın ve arkadaşı [49] bu çalışmada serbest seramik parçacıklı modüler zırh siteminin balistik performansı incelemişlerdir. İki plakanın arasına yerleştirilen serbest seramik toplar ile 3 adet kompozit malzeme üretilmiştir. Dış yüzlerinde akrilik, cam elyaf takviyeli kompozit ve alüminyum plaka kullanılmıştır. Plakaların arasına serbest halde yerleştirilen seramik bilyeler 13 mm çapında ve SiO2-Al2O3 esaslıdır. Bilyeler 2,65 gr/cm3 yoğunluğa sahiptir. Oluşturulan numunelerin üzerin balistik test uygulanmıştır. İlk test açık alanda Sarsılmaz marka Kılınç 2000 Mega model tabanca ile yapılırken ikinci test laboratuar ortamında tek kademeli gazlı silah sistemi ile

yapılmıştır. İlk testte 9 mm x 19 mm ölçülerinde mermi kullanılırken gazlı silah sistemi ile yapılan testte 0,3 kalibrelik FSP mermisi ile farklı hızlarda atışlar yapılmıştır. Test sonuçları incelendiğin dış yüzeyde kullanılan malzemelerin önemli bir balistik koruma sağlamadığı görülmüştür. Dış yüzeyin sünek olması gerektiği görülmüştür. Akrilik yüzeyde oluşan kırılma sonucunda seramik bilyeler zırhı terk ettiği için koruma kapasitesini yüksek oranda azaltmıştır. Buna karşın alüminyum dış yüzeylerde koruma kapasitesi yüksektir. Alüminyum yüzey kullanılan kompozitte tam penetrasyon olmazken cam elyaf takviyeli kompozitte tam penetrasyon görülmüştür. Seramik bilyeler incelendiğinde önemli deformasyonlar görülmüştür. Seramik bilyeler mermide yörünge kaybına neden olarak delme kabiliyetini ve enerjisini kaybetmesini sağlamıştır.

Kemal Arslan ve arkadaşı [50] bu çalışmada petek sandviç yapılı fonksiyonel kademelendirilmiş (FGM) bor karbür ve alüminyum plakaların yüksek hızlı darbe testlerini yapmıştır. Çalışmada B4C, FGM ve Al6061 yüz plakları ile petek formunda sandviç yapı elde edilmiştir. Toplamda 5 farklı orana sahip ve 56 mm x 56 mm x 8mm ölçülerinde FGM ile yapılmış kompozit malzeme elde edilmiştir. FGM plakaları üretilirken toz istifleme ve sinterleme yapılarak sıcak presleme yöntemi kullanılmıştır. Üretilen plakalar yapıştırıcı ile düşük basınç altında petek ile birleştirilmiştir. Darbe testi tek kademeli gaz tabancası ile laboratuar ortamında 0,30 kalibrelik FSP mermisi ile yapılmıştır. Mermi hızının yaklaşık değeri 605 m/s olarak ölçülmüştür. Kesit görünümü alınan numuneler incelendiğinde FGM plaka kullanılan yüz, Al6061 plaka kullanan yüze göre daha iyi darbe performansına sahip olduğu görülmüştür. FGM plakalarında, metal oranı yüksek olan bileşimlerde lokalize plastik deformasyon görülürken, seramik oranı yüksek olan bileşimlerde darbe yükünün geniş alana yayıldığı görülmüştür.

Eser Sözen ve arkadaşları [51] bu çalışmada koruyucu zırh üretimi ve balistik panellerin üretiminde kullanılan lif ve kompozit malzemeleri incelemiştir. Literatürde yer alan koruyucu zırhlar için kullanılan kompozit malzeme özellikleri, üretilen koruyucu kombinasyonları ve uygulanan balistik testler incelenerek balistik çalışma yapacak araştırmacılara literatür desteği sağlanması amaçlanmıştır. Çalışmada kumaş türleri, kumaş yapısının özellikleri, balistik testler için mermi geometrisi, çoklu kompozit yapılar hakkında bilgiler yer almaktadır. Yüksek dayanımlı lif ve polimerden oluşan kompozit kombinasyonlarında poliüretan ve epoksi gibi tutkalların kullanılacak materyale uygun olması gerektiği sonucuna ulaşılmıştır. Buna ek olarak mermi, sınır koşulu, malzeme gibi balistik testleri doğrudan etkileyen faktörlerin belirlenmesi,

yapılacak test sonucunun güvenli ve doğru bir biçimde gerçekleşmesi için gerekli olmadığına değinilmiştir.

Hande Ardıçoğlu [52] çalışmasında fonksiyonel kademelendirilmiş kompozit malzeme (FDKM) ve metal köpükten oluşan zırh malzemesinin balistik etki karşısında performansını incelemiştir. Metal köpük için AA5083 malzemesi tercih edilirken FDKM için AA5083/Al2O3 seramik malzemesi tercih edilmiştir. AA5083/Al2O3 seramik malzemesi toz metalurjisi yöntemi ile üretilmiştir. Yapılacak testler için 2 mm, 4 mm, 6 mm kalınlıklara sahip fonksiyonel kademeli malzeme (FDM) kullanılarak 3 adet test numunesi üretilmiştir. Yüzdesel olarak 10-60 aralığına sahip oranlarda Al2O3/AA5083 kullanılarak üretilen numunelerin toplam kalınlıkları 24 mm, 36 mm, 48 mm'dir. Numunelere makro sertlik testi, darbe testi ve balistik test uygulanmıştır. Test sonuçları taramalı elektron mikroskobu yardımı ile görüntülenmiştir. Sonuçlar incelendiğinde makro sertlik test verilerine göre kademe kalınlığının artması sertlik değerinin düşmesine neden olmuştur. Darbe test verilerine göre kalınlığı 24 mm olan numune delinirken diğer 2 numunede delinme meydana gelmemiştir. Buna ek olarak yapılan balistik testlerde tüm numuneler V50 hız limitinin üzerinde hız limit verisi yakalamıştır.

J. I. Mugica ve arkadaşları [53] bu çalışmada kendinden takviyeli polipropilen esaslı FML'nin darbe karakterizasyon ve simülasyonunu incelemişlerdir. Test için üretilen numunede alüminyum 2024 T3 metal ve Propex'ten tedarik edilen kendinden takviyeli bir polipropilen malzeme kullanılmıştır. Oluşturulacak laminat yapı için sıkıştırmalı kalıp prosesi kullanılmıştır. 250 mm x 250 mm ölçülerinde oluşturulan numune, farklı hızlarda uygulanan çekme testlerinden geçirilmek üzere 200 mm x 20 mm ölçülerinde kesilmiştir. Buna ek olarak numunelere çift eksenli eğilme-darbe testleri uygulanmıştır. Sonuçlar incelendiğinde oluşturulan laminat yapı plastik gerinme sonucunda yüksek oranda enerji absorbe ederken katmanlar arasında herhangi bağ kopması veya delaminasyon görülmemiştir. 20J enerjide çift eksenli eğilme-darbe testinin deneysel ve sayısal çalışması yapılmış ve kuvvet zaman eğrileri incelendiğinde tutarlı sonuçlar elde edilmiştir. 50J seviyesine gelindiğinde deneysel çalışmada plastik deformasyonlar meydana gelmiştir.

R. C. Alderliesten [54] ve arkadaşı bu çalışmada fiber metal kompozitlerin teknolojisi ve gelecekte kullanımını tartışmışlardır. Çalışmada oluşturulan kompozitlerin yapısal hususları konusunda hasar tolerans tasarımı, muayene, hasar

tespiti, dayanıklılık, yapısal onarım konuları hakkında bilgiler verilmiştir. Bunlara ek olarak fiber metal kompozitlerin teknolojisi hakkında malzeme davranışları, hasarın büyümesi, görülebilir hasar mekanizması, dayanıklılık ve yapısal onarıma yer verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde yapısal malzemelerin metal ve kompozitleri birleştirme potansiyelinin yüksek olması nedeniyle havacılık alanında daha çok ilerlemesi gerektiği görülmüştür. Ayrıca fiber metal kompozit teknolojilerinin uygulaması ile düşük ağırlık yakalanabileceğine değinilmiştir.

Ceren Türkdoğan'ın [55] 2019 yılında yaptığı çalışmasında "Adhezyon ile birleştirilmiş cam elyaf takviyeli polipropilen/alüminyum esaslı fiber metal laminatların geliştirilmesi" konusu araştırılmıştır. Cam elyaf takviyeli polipropilen/alüminyum yapılarının yapışma özelliklerinin, alüminyum yüzeylerin amino bazlı silan bağlayıcı ajanı ve kumlama ile işlenmesi sonucu geliştiği gözlemlenmiştir. Mod-I kırılma tokluğu değerlerine göre ise, silanla yüzey önişlemine tabi tutulmuş numuneler en iyi sonuçları vermiştir.

Metin Tanaoğlu arkadaşı [24] fiber ile takviyelendirilmiş polimer-metal laminat yapı ve alüminyum köpük çekirdekli sandviç kompozitlerin mekanik davranışlarını incelemiştir. Deneyde farklı kalınlıklara ve 2 farklı yapıştırma tekniğine sahip 6 adet numune üretilerek 3 nokta eğilme testi uygulanmıştır. Oluşturulacak sandviç numune için 0,6 mm kalınlığında cam elyaf ile takviyelendirilmiş polipropilen (GFPP) ve 2 mm kalınlığında alüminyum plakalardan oluşan FML yapı kullanılmıştır. Köpük malzeme olarak 8 mm, 20 mm, 30 mm kalınlıklarında alüminyum tercih edilmiştir. Üretim aşamasında sıcak presleme tekniği ile 1,5 MPa ve 200 santigrat derece sıcaklık altında 10 dakika baskı uygulanmıştır. 50 mm x 50 mm ölçülerinde hazırlanan numuneler 3 nokta eğilme testine tabii tutulmuştur. Sonuçlar incelendiğinde köpük kalınlığının artması, silan yüzey işlemi yapıldıktan sonra GFPP ile birleştirilen köpük içerikli yapılarda elastiklik modülünde artış görülürken; PP bazlı film kullanılarak birleştirilen numunelerde artış görülmemiştir. Alüminyum köpükte kalınlık artması, absorbe edilen enerji miktarını da arttırmıştır. Bunlara ek olarak 30 mm köpük kullanılan numunelerde, 8 mm köpüklü numunelere göre daha yüksek yüklere maruz kalırken düşük kesme mukavemeti göstermiştir.

Muhsin Alçı [56] bu çalışmada katmanlı kompozit plakalar ve bal peteği ile oluşturulan kompozit yapıların düşük hızlı darbe deneylerini yapmıştır. Çalışmada 2

çeşit numune yapılmıştır. İlk numunede E-cam-epoksiden yapılmış 0-90 derece dizilimli katmanlı kompozit oluşturulmuştur. Üretim sırasında vakum infüzyon yöntemi kullanılarak reçine emdirilmiştir. İkinci numunede ise E-cam-epoksiden yapılan kompozit nomex bal peteği ile birleştirilerek sandviç yapı elde edilmiştir. Bal peteği birleştirilirken Araldite 2015 endüstriyel yapıştırıcı kullanılmıştır. 1200 mm x 800 mm ölçülerinde yapılan numune 85 mm x 85 mm ölçülerinde su jeti ile dilimlenerek plaka kenarlarında oluşacak delaminasyonların önüne geçilmiştir. İlk numune 2, 3, 4 m/s vuruş hızlarında testler yapılmıştır. İkinci numuneye 3, 5, 7 m/s hızlarda testler yapılmıştır. Sonuçlar incelendiğinde ilk numunede vuruş hızlarının artması numunede meydana gelene delaminasyonu arttırdığı görülmüştür. İkinci numunede hızların artması üst plakalarda oluşan delaminasyonu arttırırken alt plakalarda delaminasyon görülmemiştir. Deneyin sayısal modellemesi yapılmış ve deneysel sonuçlarla tutarlı veriler alınmıştır.

Baybora Bitlisli [3] bu çalışmada zırhlı araçlarda yer alan kompozit zırh malzemelerini balistik açıdan incelemiştir. Çalışma iki aşamadan oluşup ilk aşamada takviye olarak kullanılan Aramid, Hibrit, Cam elyafı türleri, Karbon ve UHMWPE malzemeleri ile reçine olmaksızın PE film tabakaları kullanılarak birleştirilmiş ve kat kat laminasyon yapılmıştır. Sıcaklık ve basınç altında preslenen kompozitlere balistik atışlar yapılmıştır. İkinci aşamada ise tamamı yerli ürünlerden oluşan St37 plaka, ince çelik tel ve kalın çelik tel kullanılan hibrit kompozit malzeme yapılarak, ilk aşamada oluşturulan numuneler yakın performans elde edilmeye çalışılmıştır. Oluşturulan numunelere bir atış poligonunda 5,038 metre mesafeden ortalama 363 m/s hızla atış yapılmıştır. Sonuçlar incelendiğinde deneyin ilk aşaması için yapılan kompozitlerden karbon elyafı ve UHMWPE numunesi mermi çekirdeğini durdururken UHMWPE+Aramid ve cam elyafı numuneleri mermi çekirdeğini durduramamıştır. Karbomid elyafında ise mermi çekirdeği numunenin arkasından çıkarak orada kalmıştır. Bunlara ek olarak üretimde kullanılan basınç miktarının artması, oluşturulan malzemenin sertliğini arttırırken deformasyonu azaltmıştır. Deneyin ikinci aşamasının sonuçlarında ise ince çelik telden yapılan kompozit mermi çekirdeğini durduramazken kalın çelik tel ve St37 plaka kullanılan kompozitler mermi çekirdeğini durdurmuştur.

2. BÖLÜM

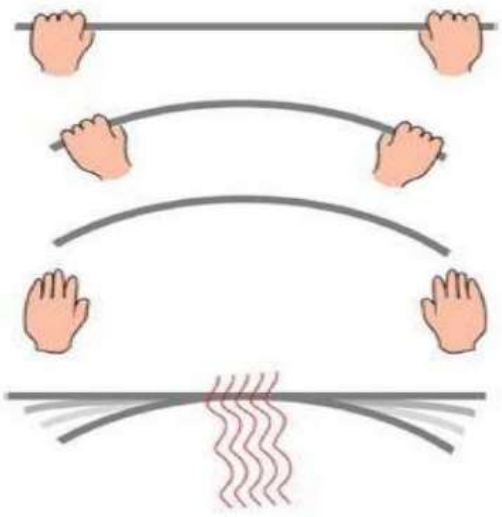
YÖNTEM VE MATERYAL

2.1. Giriş

Bu bölümde, tez çalışması kapsamında yer alan fiber metal laminatlar, şekil hafızalı malzemeler, nitinol, süperelastiklik ile numunenin yapım aşamaları, numunede kullanılan, test düzeneği, kullanılan mermi hakkında bilgiler verilmiştir.

2.2. Şekil Hafızalı Malzemeler

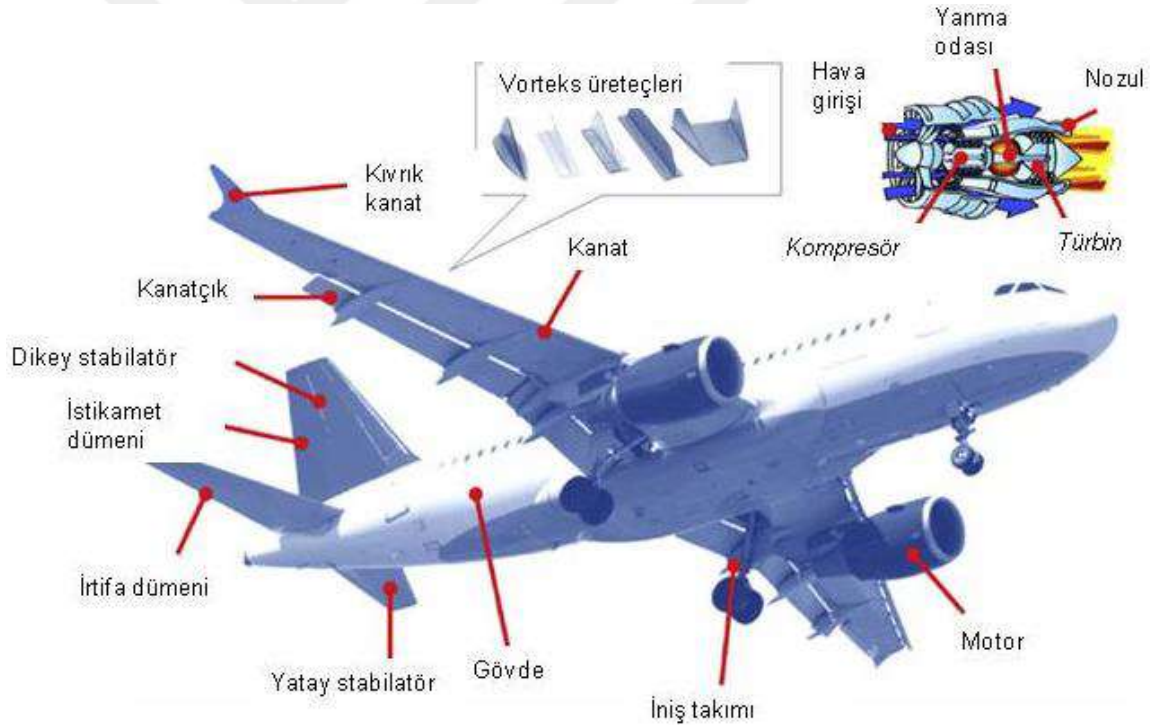
Şekil hafızalı malzemeler deforme edildikten sonra belirli dış etkiler altında daha önceden programlanmış şekle dönebilen malzemelerdir. Şekil hafıza durumu ilk olarak 1932 yılı dolaylarında İsveçli fizikçi tarafından altın-kadmiyum(Au-Cd) alaşımı incelenmiştir. 1938 yılına gelindiğinde ise pirinç malzemesi üzerinde faz dönüşümleri ile birlikte şekil hafıza gözlendi.



Şekil 2.1. Şekil Hafızalı Malzeme

1951 yılında altın-kadmiyum alaşımlı bir malzemede şekil hafızası tespit edildi. 1960lı yılların başında ABD savaş gereçleri donanma laboratuarında (NOL), araştırmacıların yanan bir sigaranın alaşımın şeklini değiştirmesi sonucunda nitinol keşfedilmiştir. En çok kullanılan malzemelerin başında olan nitinol, nikel titanyum(NiTi) alaşımıdır.

Şekil hafızalı malzemeler birçok alanda kullanılmaktadır. Biyouyumluluk, süperelastik davranış, korozyon direnci, yüksek mukavemet özelliklerinden dolayı biyomedikal ve mühendislik alanlarında uygulamaları bulunmaktadır. Stent, elyaf, kıskaç gibi cerrahi ürünlerde, ortodontik tedavi araçlarında, ortopedik uygulama araçlarında, klima sensörlerinde, gözlük çerçevelerinde, sütyen tellerinde, giysilerde ve tekstil uygulamalarında yer almaktadır. Günümüzde havacılık ve uzay araçlarında kullanımı devam etmektedir [57].

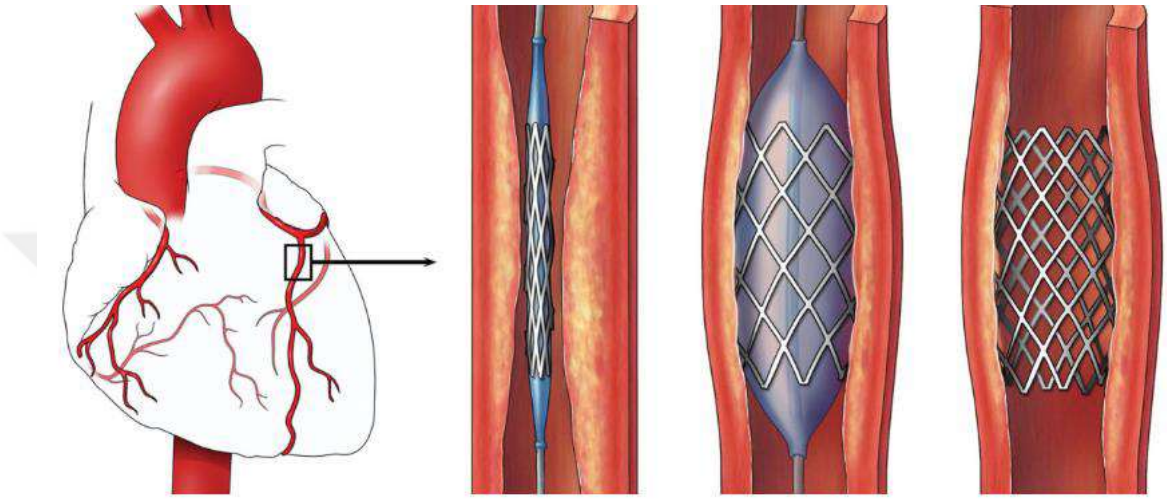


Şekil 2.2. Uçaklarda Kullanılan Şekil Hafızalı Malzemeler

2.3. Nitinol

Adını alaşımdaki metaller ve üretildiği yerden alan nitinolde(Nickel-Titanium Naval Ordnance Laboratory) nikel ve titanyum oranları eşit olabilir. Genellikle %55 nikel %45 titanyum alaşımı kullanılır. Nitinol -200°C ile 100°C arasında dönüşüm sıcaklığına sahiptir. 1310°C ergime sıcaklığına, 6,45g/cm^3 yoğunluğa ve biyouyumluluğa sahip bir

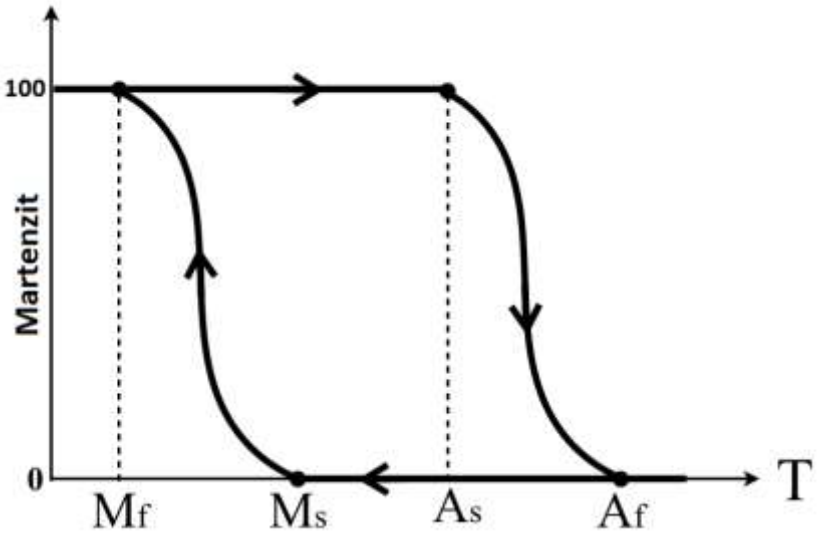
alaşımdır. Sıcaklık etkisinden dolayı mekanik özelliklerinin değişmesi sebebi ile akıllı malzeme olarak da adlandırılır**.** Nitinol ortodontik tedavilerde, diş implantı, damak açıcı, ortodontik distrakter, endontide kullanılan diş frezi, ortopedik zımba, kemik içi çivi, protez, omurga bileziği, stent uygulamaları gibi çokça alanda yaygın olarak kullanılmaktadır [58][59][60].



Şekil 2.3. Damara Stent Uygulaması

Belirli dış etkiler sonucu deforme olan nitinol alaşımı, sıcaklık etkisi ile eski haline dönebilmesi için şekil hafızanın programlanması gerekir. Öncelikle alaşıma hafıza kazandırmak için alaşım istenen forma getirilir. Belirli forma giren alaşımın hareketi sabitlenerek ısıtılır ve soğutulur. Deforme edilen alaşımın şekil hafızasını güçlendirmek için ısıtma işlemi tekrar edilir. Devamında ise çevre sıcaklığına gelmesi için soğutma işlemi yapılır. Isıtma ve soğutma işlemi tekrar edilebilir. Böylece şekil hafızası programlanmış nitinol alaşımı elde edilir.

ŞHA'ın programlanan şekle dönebilmesinin altında katı faz değişimleri yer almaktadır. Normal şartlarda soğuk halde martenzit faza sahip alaşım, deforme edilerek kristal yapısında değişim meydana gelir. Kristal yapısı değişen alaşıma dönüşüm sıcaklığına kadar ısı verilir. Sıcaklığı artan alaşımda katı faz dönüşümü meydana gelerek martenzit yapıdan östenit yapıya geçer ve orijinal görüntüsüne döner.



Şekil 2.4. Şekil Hafızalı Alaşımlarda Dönüşüm Grafiği

Şekilde yer alan dönüşüm sıcaklık grafiğinde:

T: Sıcaklık

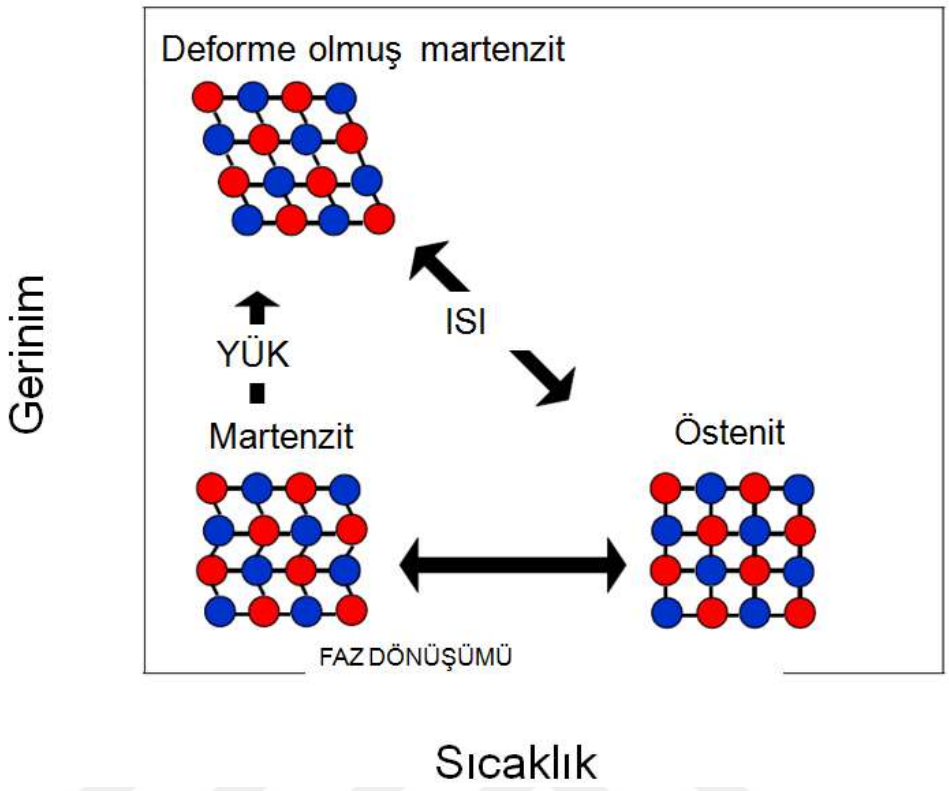
M_s: Soğutma yönlü martenzit başlangıç sıcaklığı (östenit oranı %100)

M_f: Soğutma yönlü martenzit bitiş sıcaklığı (östenit oranı %0)

A_s: Isıtma yönlü östenit başlangıç sıcaklığı (martenzit oranı %100)

A_f: Isıtma yönlü östenit bitiş sıcaklığı (östenit oranı %100)

Nitinol alaşımı yüksek sıcaklık değerlerinde %100 östenit fazındadır. Soğutulma yapılırken soğutma yönlü martenzit başlangıç sıcaklığına (M_s) ulaşır. Bu sıcaklık değerinin altında östenit oranı düşerken martenzit oranı artar. Düşük sıcaklığa sahip nitinol %100 martenzit fazına geçerek soğutma yönlü martenzit bitiş sıcaklığına (M_f) ulaşır.

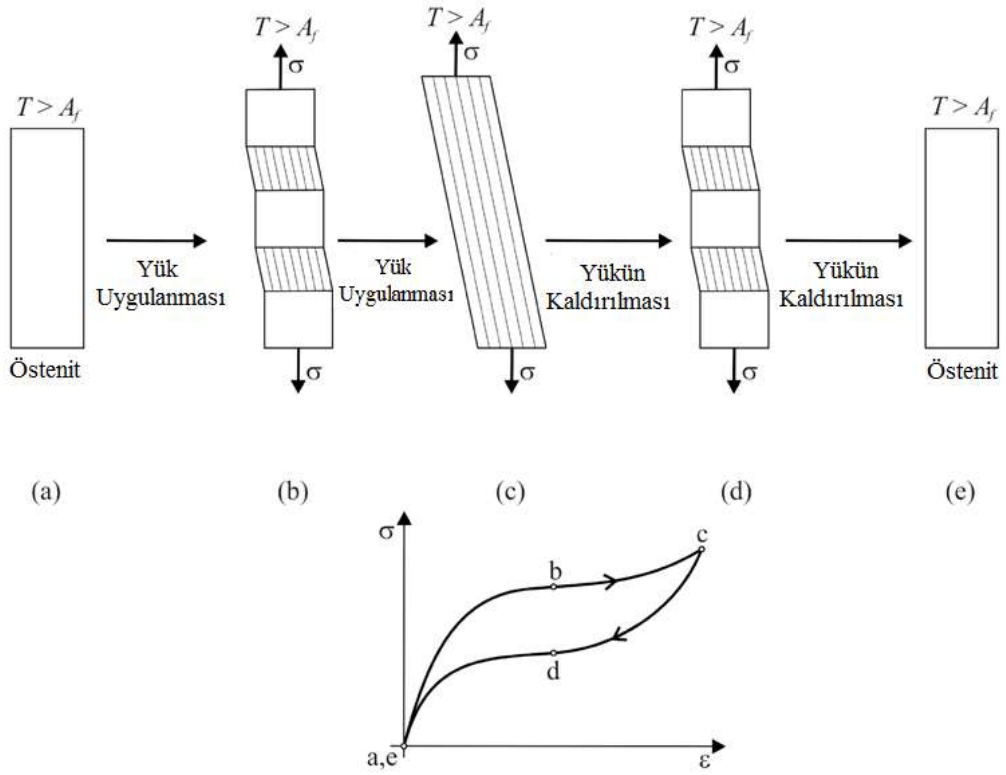


Şekil 2.5. Şekil Hafıza Etkisi

Şekil hafızanın etkisi tek veya çift yönlü olabilir. Sadece ısı verilince östenit faza geçen alaşımlar için tek, ısı verilince östenit soğutulunca martenzit faza geçen ve bu işlemi birçok kez tekrar eden alaşımların şekil hafızası çift yönlüdür [61].

2.4. Süperelastiklik

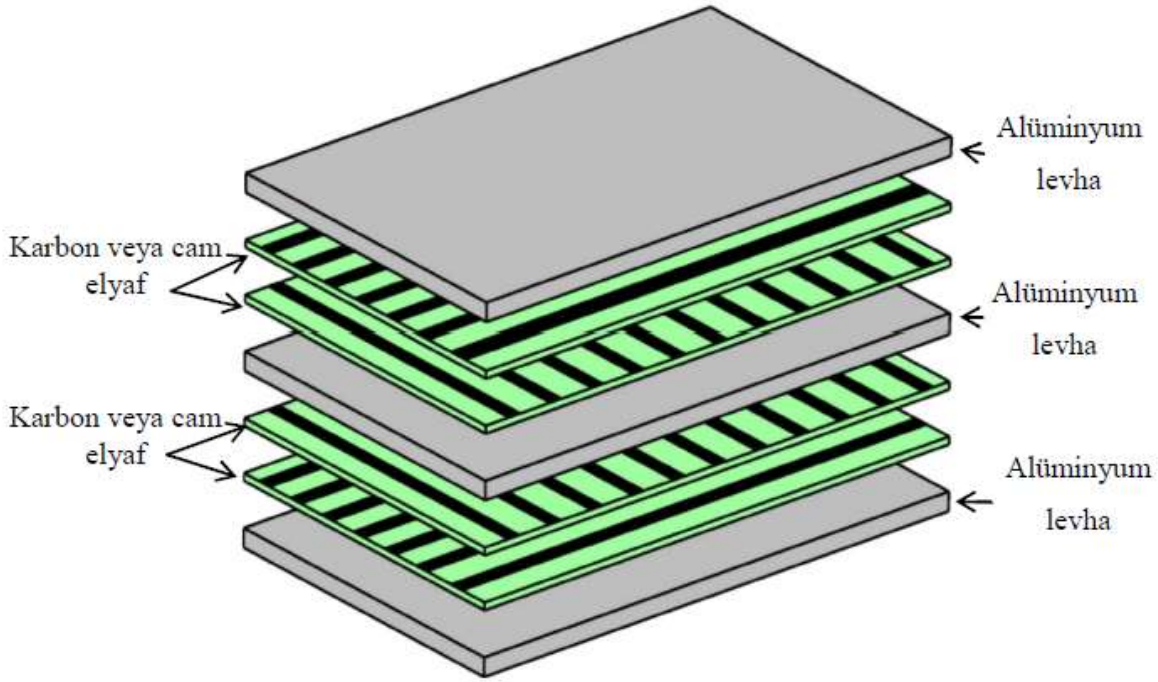
ŞHA'larda lineer olmayan esnek davranışlar süperelastikliktir. Süperelastiklik alaşımlarda oluşan faz dönüşümü sonucunda ortaya çıkar. A_f sıcaklığının üzerine meydana gelmesi süperelastikliğin bir şartıdır. Östenit fazda olan alaşım şekil değişimine zorlandığında, şekil hafıza etkisine benzer bir durum gerçekleşir. Alaşım faz değişimine uğrayarak martenzit oluşturur. Alaşıma uygulanan gerilme kaldırıldığında ise tekrar faz dönüşümü oluşarak östenit fazı oluşur. Süperelastikliğe nitinol örneği verilebilir. Ortodonti tedavisinde kullanılan teller nitinolden yapılmaktadır. Nitinol alaşımının A_f sıcaklığı -5°C ile 10°C aralığından bulunmaktadır. Bu nedenle ortodontik tel ağız içinde sürekli olarak A_f sıcaklığının üzerindedir. Bu durum ortodontik tele süperelastiklik özelliği kazandırır [62].



Şekil 2.6. Süperelastik dönüşüm

2.5. Fiber Metal Laminat Kompozitler

İkinci dünya savaşından sonra kompozit malzemeler, yüksek korozyon ve yorulma dirençleri ve yüksek mukavemetleri sayesinde özellikle havacılık sanayiinde artan oranda kullanılmıştır. Fakat kompozit malzemelerin darbe davranışlarının düşük olması, darbe davranışlarının yüksek olduğu FML'lerin geliştirilmesine yol açmıştır. FML'lerin tarihçesi 1945'li yıllarda Rob Schliekelmann'ın Fokker firmasında alüminyum tabakaları yapıştırıp otoklavda kürlemesine dayanmaktadır.



Şekil 2.7. Fiber Metal Laminat Kompozit Yapısı

Jaap Schijve bu metal tabakalarda yorulma çatlaklarının ilerlemesinin yavaş olduğunu fark etmiştir: çatlak bir tabakada ilerlese bile, diğer tabakalar buna engel olmaktadır. Bunun üzerine, Jaap Schijve ve Boud Vogelesang karbon ve aramid takviyeli metal plakaları yapıştırarak Delft üniversitesinde başarılı sonuçlar elde etmişlerdir. Fakat deneyler ve testler ilerledikçe delaminasyon (yapıştırıcının metalden ayrışması) problemi ile karşılaşmışlardır. Çatlağın olduğu ama delaminasyonun olmadığı durumda fiberler çok uzuyor ve sonunda kırılıyor, delaminasyon olduğu durumda ise bu sefer çatlak çok açılıyor ve çok hızlı bir şekilde ilerliyordu. Çatlak büyümesi ve delaminasyon arasında dengenin bulunması gerekiyordu. Bu amaçla Marissen, aramid fiber-alüminyum plakalar kullanılarak elde edilen hibrit malzemelerdeki yorulma çatlak ilerleyişini hesaplayacak analitik model üzerinde çalışmıştır. Delft üniversitesinde yapılan çalışmalar, üniversitenin, aramid fiber üreten AKZO firması, ince metal plakalar üreten ALCOA firması ve yapıştırıcı üreten 3M firması ile ortak çalışmalar yapmalarına yol açmıştır.

1950'lerde F-27'lerin, 1960'larda ise F-28'lerin geliştirilmesinden sonra Fokker firması yeni bir uçak geliştirmediği için, aramid fiber takviyeli FML'ler ve sonrasında (1990'lar) cam elyaf takviyeli FML'lerin yeni bir uçakta kullanılma çalışmaları yarım

kalmıştır. Fakat daha sonra Hollanda Havacılık Programları Kurulu'nun (NIVR) destekleri ile 1984 yılında Fokker, Delft üniversitesi ve ALCOA, daha önceden Fokker tarafından üretilen ve başarılı bir şekilde uçan F-27 kanadının bir parçasının aramid takviyeli alüminyum laminatlar ile üretilmesi konusunda anlaşmışlardır. ALCOA firması 2 metre uzunluğunda ve 1,5 metre genişliğinde bir kanat parçası üretme taahhüdünde bulunmuştur (o zamana kadar üretilen en büyük parça A4 kağıdı boyutlarında idi). Aramid takviyeli alüminyum laminatlar 1982/83 yılında ALCOA firması tarafından ARALL adı altında ticarileştirilmiştir. İlk başta ARALL 1 ve 2'yi ticarileştiren ALCOA, 1987 yılında ARALL 3 ve 4'ü piyasaya sürmüştür. Yapılan uzun çalışmalardan sonra, 1985 yılında ARALL ile üretilen ilk parça Paris Air Show'da sergilenmiştir. Basma durumunda, ARALL'ın düşük yorulma özelliklerini arttırmak için, alüminyum plakalar arasına camın serildiği FML'ler (GLARE) geliştirilmiştir. GLARE, 1987 yılında AKZO tarafından patentlenmiş, 1989'da Airbus A330/340'ın gövdesinde test edilmiş ve ilk kez 1990'lı yıllarda Boeing 777'nin kargo zemininde ve Bombardier 125'in kirişlerinde kullanılmıştır. Günümüzde ise Airbus A380 gövdesinde GLARE parçalar kullanılmaktadır.



Şekil 2.8. Airbus A380'de FML kullanımı

Gelişmiş kompozit malzemeler ve fiber-metal laminatlar, uçak gövdesi yapılarında ağırlık tasarrufu ve dayanıklılıkta önemli gelişmeler sağlama potansiyeline de

sahiptir. Fiber Metal Laminatlar, fiber takviyeli polimer katmanlarla bağlanmış metal katmanlardan oluşan gelişmiş bir hibrit malzeme sistemidir.

Fiber Metal Laminatlar arasında, kompozit malzemenin kendinden takviyeli bir termoplastik olduğu vurgulanmalıdır. Kompozit malzemeler, yüksek sertlik sunarlar ve fiberler ile matrisin visko-elasto-plastik yapısı nedeniyle genellikle birçok fiber takviyeli termoset malzemeden daha yüksek olan tokluk dayanımına sahiptir. Ayrıca, düşük yoğunluk, geri dönüştürülebilirlik ve sıcaklık altında şekillendirme olasılığı gibi diğer ilginç özelliklere de sahiptir. Fiber Metal Laminatlar oluşturmak için metal levhalarla birleştirilirlerse, geleneksel termoset matris FML'lere (örneğin GLARE) kıyasla çok daha fazla dayanıklılık elde edilir. Bu da onları belirli darbe uygulamaları için çok elverişli kılar. Bununla birlikte, bu tür yapıların uygun şekilde tasarlanması, darbe davranışlarının ve özellikle kendi kendini güçlendiren termoplastik kompozitlerden birinin derinlemesine anlaşılmasını gerektirir [63][64].

2.6. Numunenin üretimi

Deney kapsamında numunenin üretimine fiber metal yapıdan başlanmıştır. Fiber metal yapıyı oluşturmak için -18 °C sıcaklığında muhafaza edilen karbon prepreg kullanılmıştır.



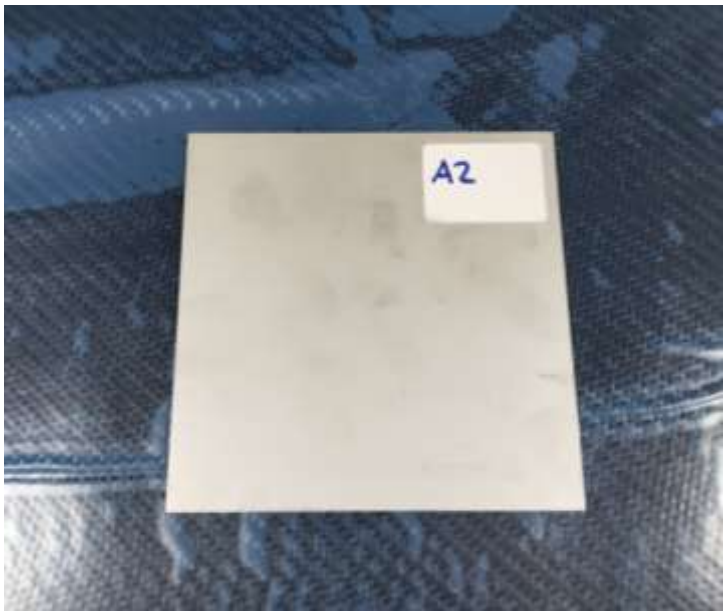
Şekil 2.9. Prepreg Rulonun Saklama Koşulu

Prepreg rulosu tezgâha alınır. Yapılacak numunenin ölçülerinde (150 x 150 mm) her yüze 4 kat olacak şekilde toplam 16 adet kesilir.



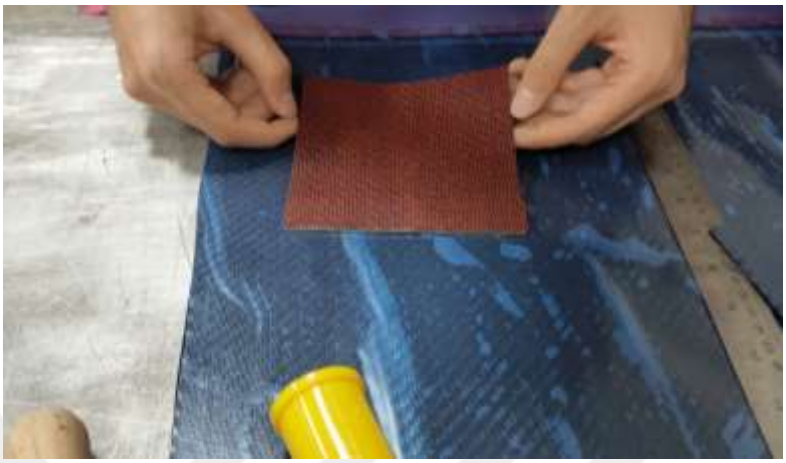
Şekil 2.10. FML Yapısı İçin Prepreg Boyutlandırması

Numunede kullanılacak nitinol plakalar 2mm ve 3mm kalınlığa sahiptir. Kesilen karbon prepregleri nitinole yapıştırmadan önce plakaların yüzeyi aseton ile dikkatle temizlenerek kirden ve yağdan arındırılır.



Şekil 2.11. Nitinol Plaka

Temizlenen nitinol plakaların üzerine karbon prepreg yapıştırılır. Prepregin dışarı taşmamasına dikkat edilir.



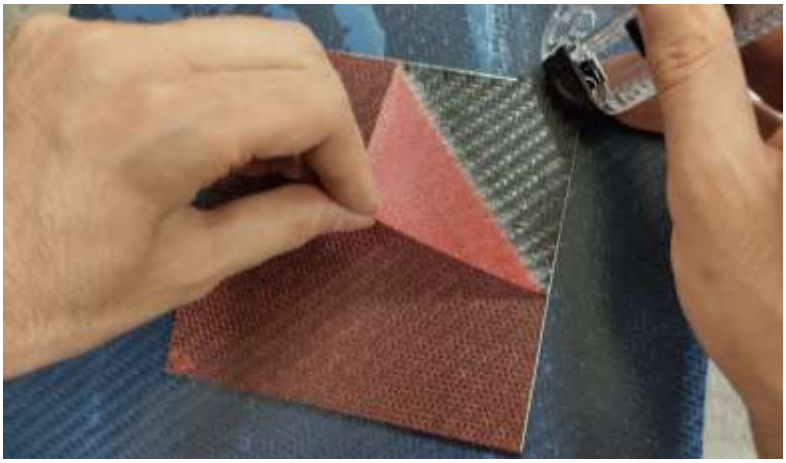
Şekil 2.12. Nitinol Plaka İle Birleştirilen Prepreg

Nitinol plaka ve karbon prepreg arasında sağlıklı birleşim olması için hava kabarcıkları giderilmelidir. Bunun için bir rulo kullanılarak tam yapışma sağlanır.



Şekil 2.13. Nitinol ve Prepreg Arası Hava Boşluğunun Alınması

Yapışma sağlandıktan sonra karbon prepregte yer alan koruyucu bant çıkarılır. Böylelikle ikinci karbon prepreg katmanı ile sağlıklı birleşim sağlanacaktır.



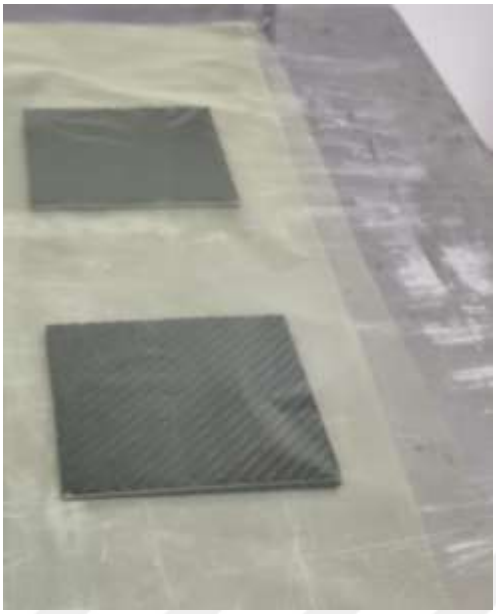
Şekil 2.14. Koruyucu Bandın Prepregden Ayrılması

Her katman rulo yardımı ile hava kabarcıklarından arındırıldıktan sonra yapıştırılır. Nitinol plakanın her yüzünde 4 adet karbon prepreg bulunmaktadır. Yapışma sağlandıktan sonra kürlenme işlemine geçilir. Kürlenmeye hazırlanan karbon prepreg yapıştırılan nitinol plakalar ısıtıcı özellikli bir tezgâha yerleştirilir.



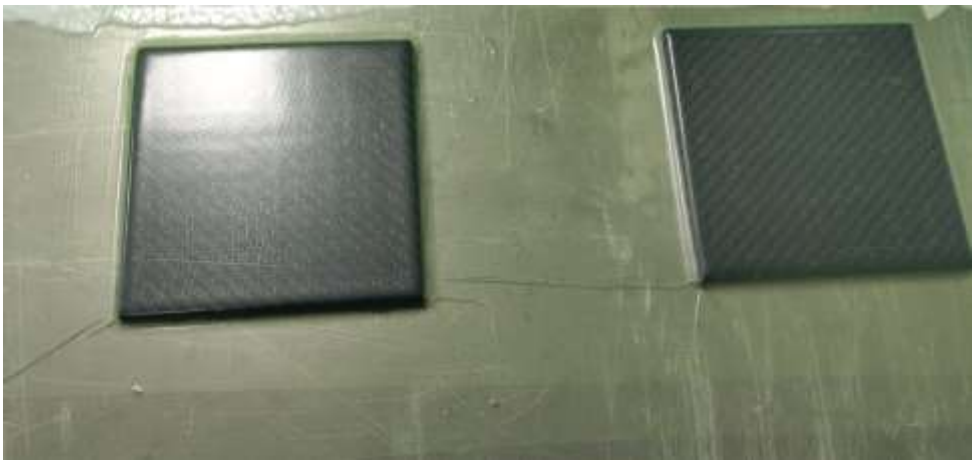
Şekil 2.15. Kürlenmeye Hazırlanmış FML

Kürlenme işlemi için torbalı vakum yöntemi kullanılmıştır. Sıcaklığı ayarlanan tezgâhta fiber metalin üzerine torba yerleştirilir.



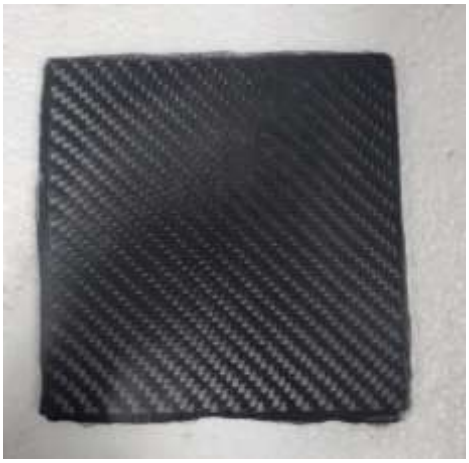
Şekil 2.16. Vakum Torbalama Yöntemi İle Kürlenme

Yerleştirilen torbanın tüm kenarları hava almayacak şekilde çift taraflı bant yardımı ile kapatılarak sızdırmazlık sağlanır. Vakum için bırakılan boşluktan 1atm basıncında hava çekilerek kürlenmeye bırakılır.



Şekil 2.17. Vakum Altında Bırakılan FML

Numune üretiminde yüzey kalitesini arttırmak için battaniye kullanılmamıştır. Üretilen numuneler bir keski yardımı ile fazla reçineden arındırılmak için tezgâha alınır ve yapıştırılmaya hazırlanır.



Şekil 2.18. Sandviç Yapı İçin Hazırlanan Kürlenmiş FML

Reçine arındırma işleminin tamamlanmasının ardından FML yapı Airex köpük ve nitinol plaka ile yapıştırılma işlemine geçilir. Araldite 2000 yapıştırıcı FML yapısına yapıştırıcı tabancası ile sıkılır.



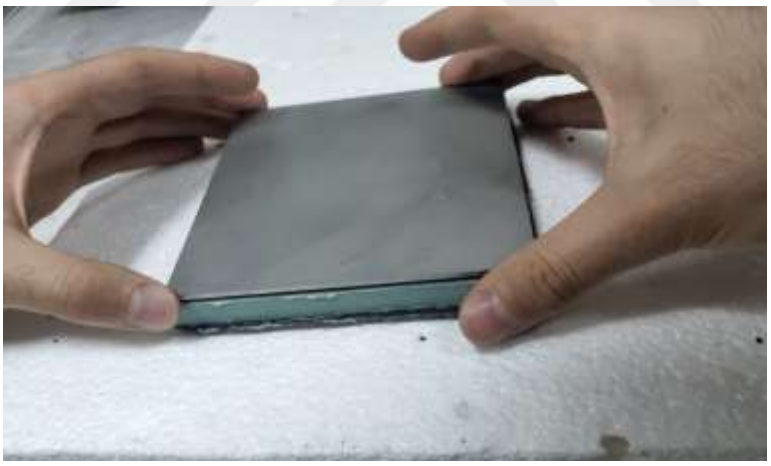
Şekil 2.19. Sandviç Yapı İçin Yapıştırıcı Kullanımı

Sıkılan yapıştırıcı bir spatula yardımı ile boşluk kalmayacak şekilde her noktaya eşit olarak dağıtılır.



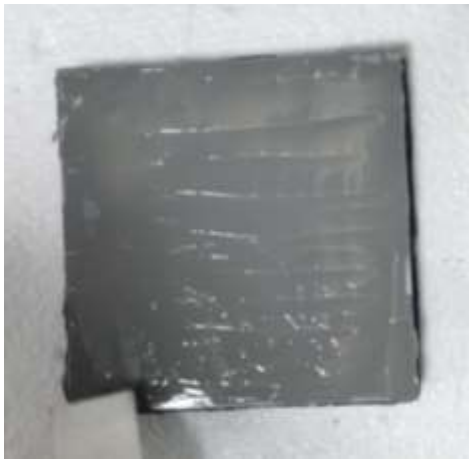
Şekil 2.20. Spatula İle Yayılan Yapıştırıcı

FML için uygulanan yapıştırma işlemi Airex köpük için de uygulanır. Aynı işlemler uygulandıktan sonra FML yapı ile köpük birleştirilir. Oluşturulmakta olan sandviç yapının ortasında yer alacak nitinol plaka, köpükle birleştirilerek tekrar yapıştırıcı uygulanır.



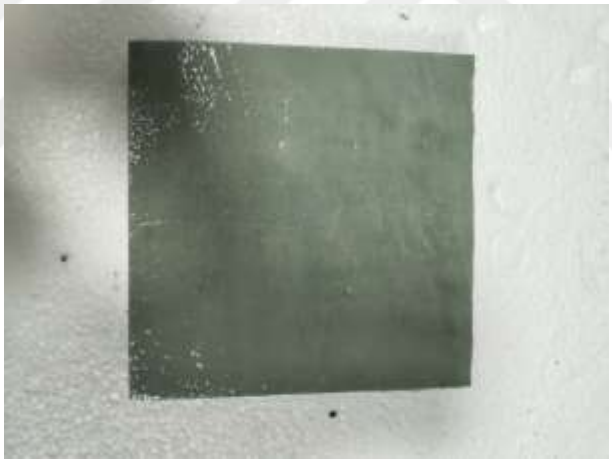
Şekil 2.21. Airex Köpük İle Nitinol Plakanın Yapıştırılması

Nitinol plaka yapıştırıcı uygulanarak ikinci Airex köpük ile birleşime hazırlanır. Spatula ile homojen dağılım elde edilir.



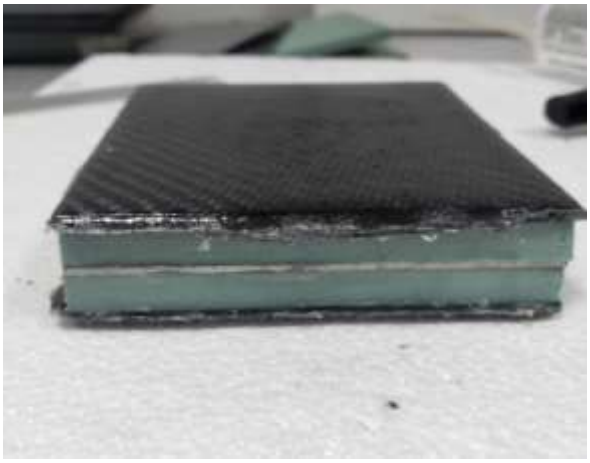
Şekil 2.22. Nitinol Plakanın Airex Köpük İle Birleşime Hazırlanması

İkinci Airex köpük ile nitinol arasında birleşim sağlanmasının ardından numune üst FML için yapıştırma uygulaması ile hazırlanır.



Şekil 2.23. Airex Köpük Üzerine Yapıştırıcı Uygulanması

Spatula ile homojen dağıtılan yapıştırıcı sonrasında son FML yapı ile birleştirilerek numunenin son görünümü verilmiş olur.



Şekil 2.24. Yapıştırılmış Numune

Tüm yapıştırma işlemlerinin ardından yapışma kalitesini arttırmak için numunelerin üzerine ağırlıklar konulur. Yük altından bırakılan numune yapışma sağlanması için bekletilir.



Şekil 2.25. Sağlıklı Birleşme İçin Ağırlık Uygulaması

Tüm bu işlemlerin ardından numuneler balistik testlere hazır son görünümünü kazanır.



Şekil 2.26. Teste Hazır Numune

2.7. Balistik

Balistik kelimesi Roma İmparatorluğuna uzanan köke sahiptir. Latince'de "Balista" denilen ve Roma ordusunun kuşatmalarda gülle ve büyük okları, kale surlarına atmak için kullandığı mancınık sisteminden almaktadır. Balista silahını kullanan kişilerin hedefe isabet edecek atış yapması için birtakım hesaplamalar yaparak silahı ayarlaması gerekmektedir. Bu durum modern balistik uygulamasının ilkinin oluşmasına neden olmuştur. Balistik biliminin güncel tanımı fişeğin ateşlenmesi ile oluşan yanma odasında ve namluda basınç ile ısı değişimlerini, merminin çekirdeğinin namlu içinde yaptığı ivmeli hareketi, mermi çekirdeğinin namludan çıktıktan sonra havadaki hareketini ve merminin çekirdeğinin hedef üzerinden oluşturduğu etkileri inceleyen Bilim Dalı olarak yapılmaktadır. Balistik bilimi oldukça geniş bir alanı kapsamından dolayı dört alt bilim dalına ayrılmıştır [65][66].

2.7.1. İç Balistik

İç balistik, fişeğin içinde bulunan sevk barutunun yanmaya başlamasından başlayarak merminin çekirdeğinin namluyu terk edene kadar geçen süre zarfında, fişek yatağı ile namlu içersinde oluşan basınç ve ısı değişimleri ile merminin çekirdeğinin namluda içinde hızı ve ivmesini inceleyen bilim dalıdır.

2.7.2. Dış Balistik

Dış balistik, mermi çekirdeğinin namludan çıktıktan sonra namlu ve hedef arasında hareketlerini, aerodinamik kuvvetler, moment sistemleri, dünyanın kendine has özellikleri ve meteorolojik değişkenlerin etkilerini inceleyen bilim dalıdır. Dış balistikte atışlar iki koşul altında incelenir. Bunlar atmosfer şartları ile vakumlu ortamdır.

2.7.3. Hedef Balistiği

Hedef balistiği, tüfek saçmaları, şarapnel ve mermi çekirdeğinin katı ve akışkan zeminler üzerinde oluşturduğu deformasyon ve tahribatların neden olduğu faktörleri, mermi çekirdeği ve hedef açısından inceleyen bilim dalıdır. Merminin çekirdeğinin isabet ettiği hedef canlı bir organizma olması durumunda yara balistiği bilimi üzerinde durulur.

2.7.4. Adli Balistik

Adli balistik, gerçekleşen bir olayda ateşli veya ateşsiz silahların kullanılması durumunda olay yerinden elde edilecek bütün balistik bulguları, Adli Balistik Biliminin temel kaide ve metotları kullanılarak incelendiği ve bulguların delil kimliği kazandığı bilim dalıdır.

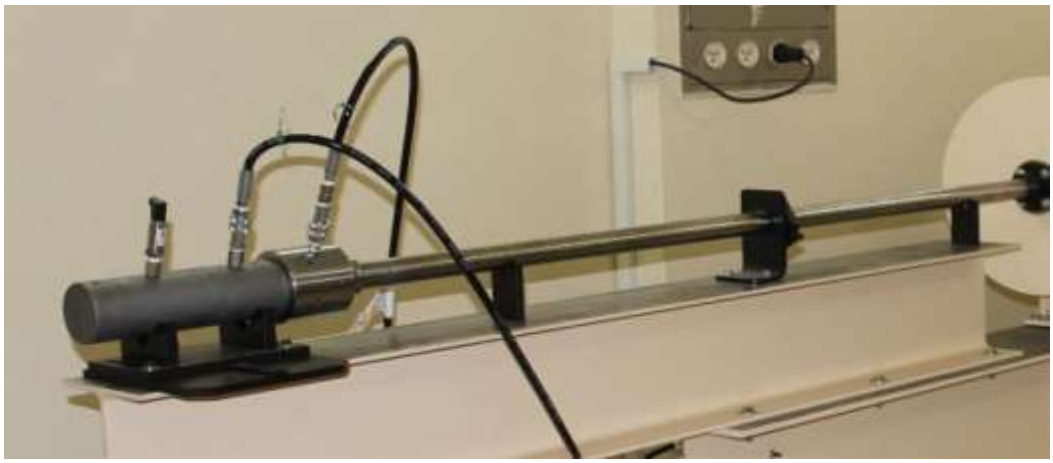
2.8. Balistik Test Sistemi

Bu proje kapsamında yapılan balistik testler Erciyes Üniversitesi Makine Mühendisliği Mekanik Laboratuarında yer alan tek kademeye sahip gaz sistemli atış silahı (gas gun) ile yapılmıştır. Gaz sistemli atış silahında hedefe mermiyi göndermek için helyum, nitrojen gibi farklı türe sahip gazlar kullanılmaktadır [66].



Şekil 2.27. Balistik Test Sistemi

Atış silahında yer alan lançer sistemi 1,8 m uzunluğa ve 12,7mm çapında namluya sahiptir.



Şekil 2.28. Lançer Sistemi

Tepe çalışma basıncı 690 bara ulaşan atış silahı, farklı tip ve özelliklerde mermileri istenilen farklı hızlara hedefe gönderebilmektedir. Farklı çentik derinliğine sahip diyaframlar yardımı ile 500 m/s ile 1200 m/s aralığında hızlar kullanılabilmektedir.



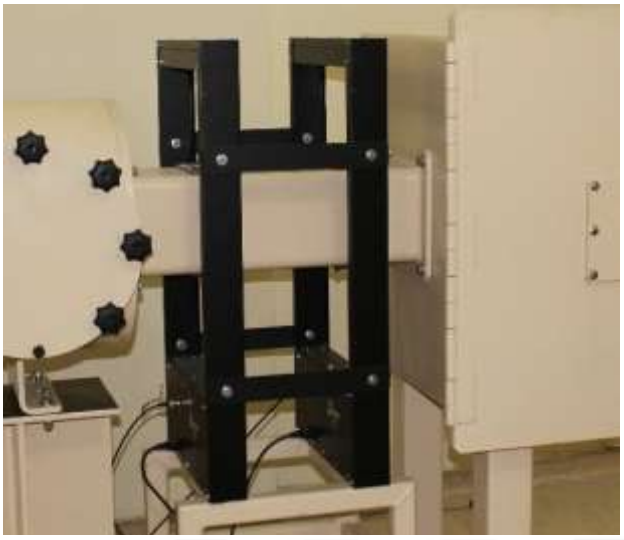
Şekil 2.29. Gaz Sistemli Atış Silahı

Atış silahında yer alan ateşleme sistemi ve basınçlandırma işlemi firma tarafından geliştirilen özel bir yazılım ile bilgisayar üzerinden kontrol edilmektedir.



Şekil 2.30. Bilgisayarlı Kontrol Ünitesi

Test esnasında hedefe giden merminin hızı atış silahına bütünleşmiş hız ölçüm sistemi ile yapılmaktadır. Hız ölçüm sisteminin prensibi sabit mesafeyle yerleştirilen iki ışık perdesinin içinden geçen merminin süresini hesaplayarak mermi hızının bulunmasına dayanır.



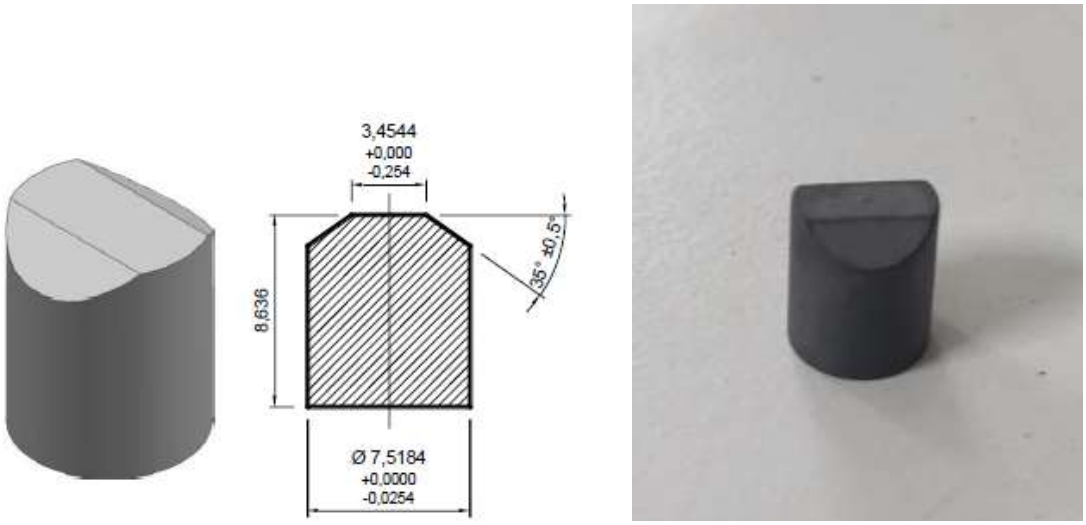
Şekil 2.31. Hız Ölçüm Perdesi

Yapılan balistik testlerde numunenin sergileyeceği performansı görmek için 0.30 kalibre FSP (Fragment Simulating Projectiles – Parçacık Benzetimli Mermiler) kullanılmıştır.

Tablo 2.1. FSP Mermi Özellikleri

Malzeme	**AISI 4340H-4337H**
Ağırlık(Grain)	**44±0,5**
Sertlik(RC)	**30±2**

Bu mermiler STANAG 2920 (NATO STANAG 2920,2003) ve MIL-DTL-46593B (MR) (MIL-DTL-46593B,2008) standartlarına göre tanımlanmıştır. FSP mermileri AISI 4340H çeliğinden üretilmiştir.



Şekil 2.32. 0.30 Kalibre FSP Mermi

FSP mermilerini atış silahı ile hedefe göndermek için namlu ağzına polimerden yapılan sabot ile çevrelenmiş mermi yerleştirilir. Sabotun görevi FSP mermisini yapısal bütünlüğünü koruyarak hedefe düz gitmesini sağlamaktır.



Şekil 2.33. Sabot İçine Yerleştirilmiş FSP Mermisi

Numune balistik test için hedef bağlama aparatına yerleştirilir. Cıvatalar yardımı ile sıkıca sabitlenen numune atışa hazır hale getirilir.



Şekil 2.34. Açılı Bağlama Aparatı

Testi görüntülemek için yüksek kare yakalama hızına sahip Photron marka görüntüleme cihazı kullanılmıştır.

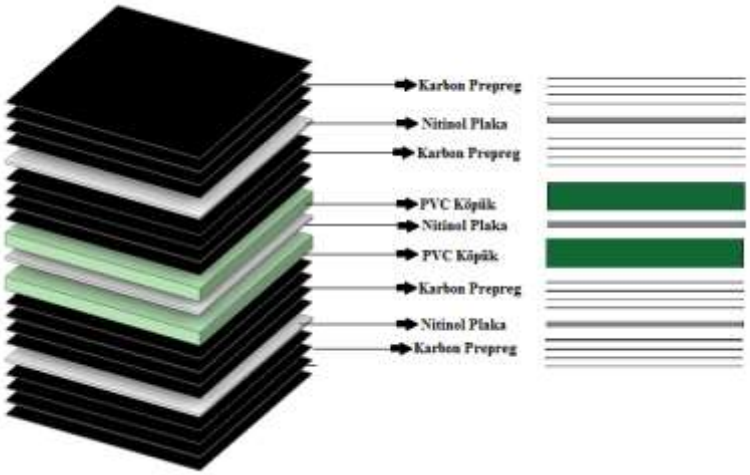


Şekil 2.35. Yüksek Hızlı Görüntüleme Cihazı

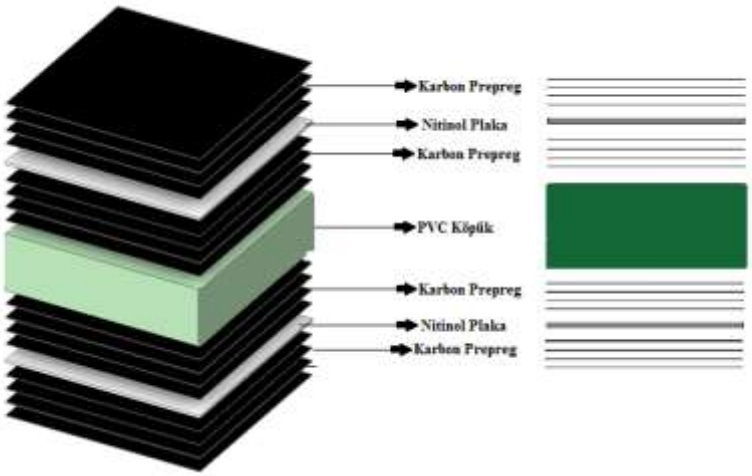
Led aydınlatıcılar ile desteklenen kamera bilgisayar kontrolü ile görüntü kaydı yaparak FSP mermisinin detaylı görüntülerinin alınmasını sağlamaktadır.



Şekil 2.36. Bilgisayar Kontrollü Görüntüleme Sistemi



Şekil 2.37. Birinci ve İkinci Numune Dizilimi



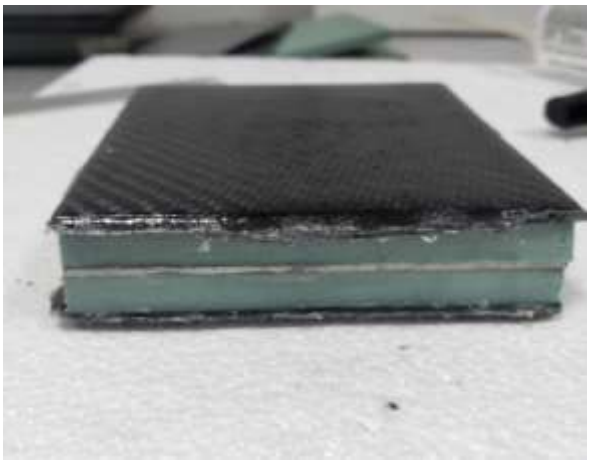
Şekil 2.38. Üçüncü Numune Dizilimi

3. BÖLÜM

BULGULAR

3.1 Yüksek Hızlı Darbe Deneyleri

Yüksek hızlı darbe deneyleri Erciyes Üniversitesi Makine Mühendisliği laboratuarlarında bulunan ekipmanlar ile gerçekleştirilmiştir. Gazlı atış silahı, led aydınlatma ve yüksek hızlı kameraların kullanıldığı deneylerde 3 adet numune kullanılarak 6 adet atış gerçekleştirilmiştir. Atışlarda FSP mermi çekirdeği kullanılarak numune üzerinde delaminasyon incelenmiştir.



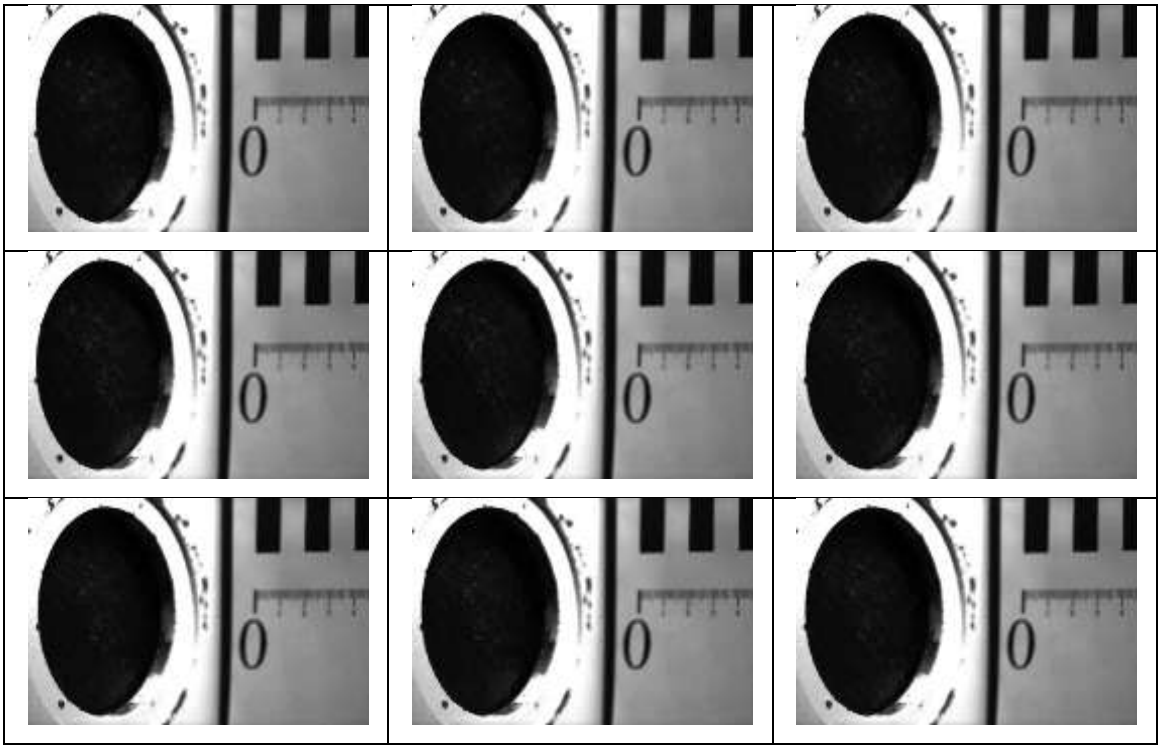
Şekil 3.1. Deney Numunesi

Deneyde kullanılan numunede her yüzünde 4 kat karbon prepreg bulunan 3 adet 2mm nitinol plaka, ve çift kat PVC köpük kullanılmıştır. Gazlı atış silahına yerleştirilen her numuneye 2 adet atış gerçekleştirilmiştir. İlk deneyde 628m/s ve 648m/s hızlarında atışlar yapılmıştır.

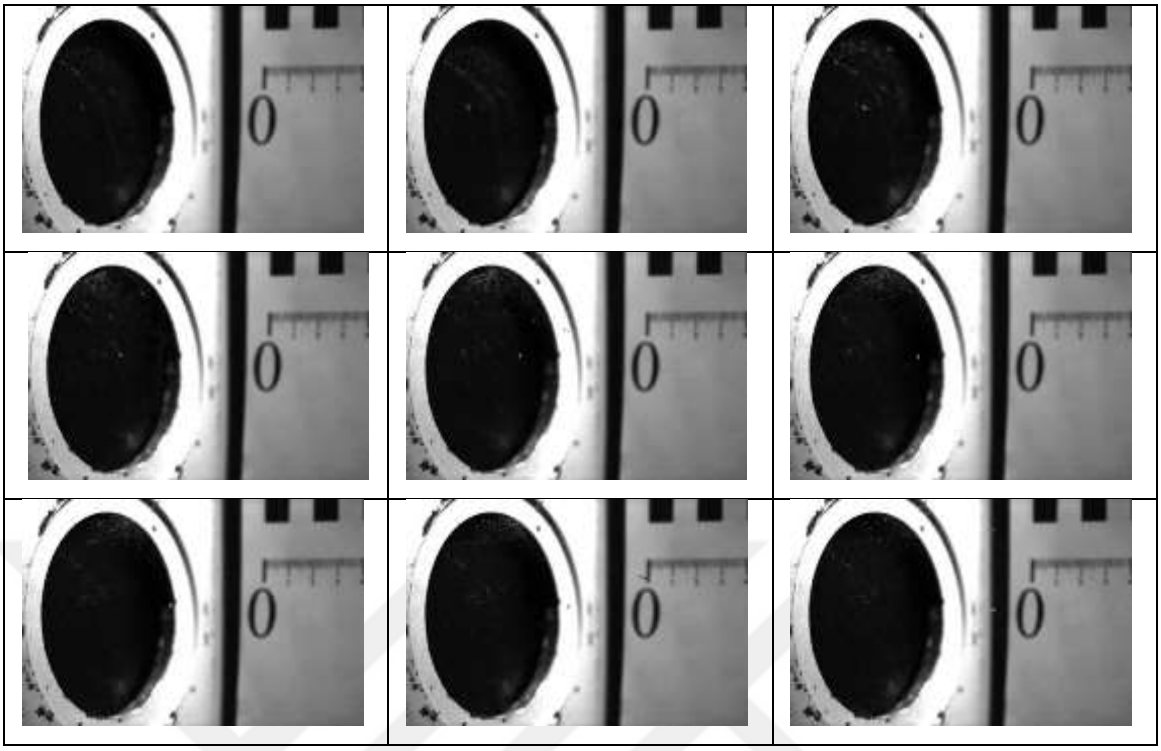


Şekil 3.2. Bir Numaralı Numune Ön ve Arka Yüzü

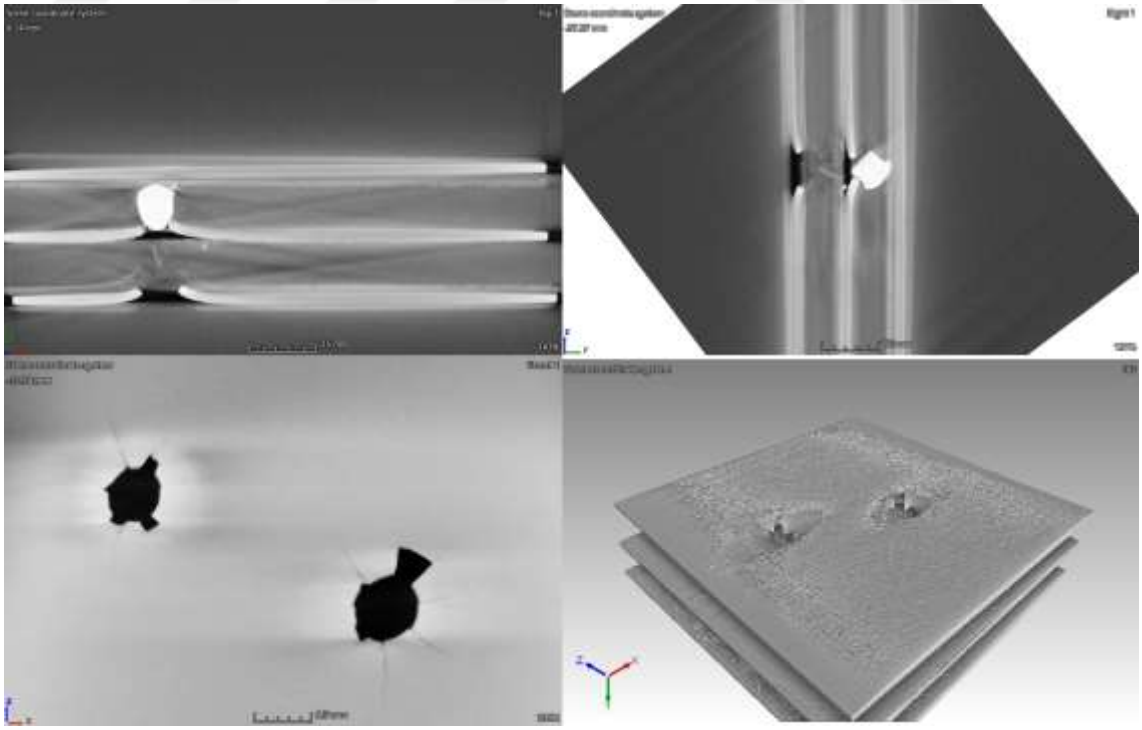
Numunenin ön yüzü incelendiğinde mermi çekirdeğinin çapından bir miktar büyük bir alana nüfuz ettiği görülüyor. Dış katmanda yer alan karbon fiberde gevrek davranış neticesinde kırılmalar meydana gelmiştir.



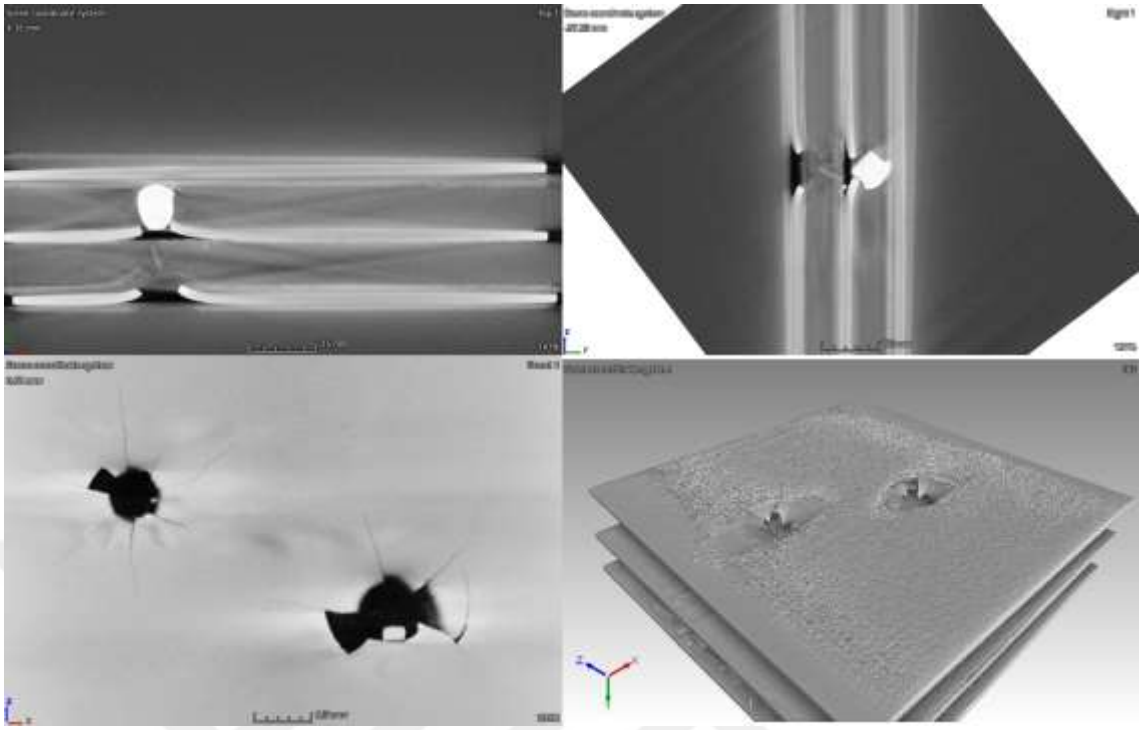
Şekil 3.3. 628m/s Hıza Ait Yüksek Hızlı Kamera Görüntüsü



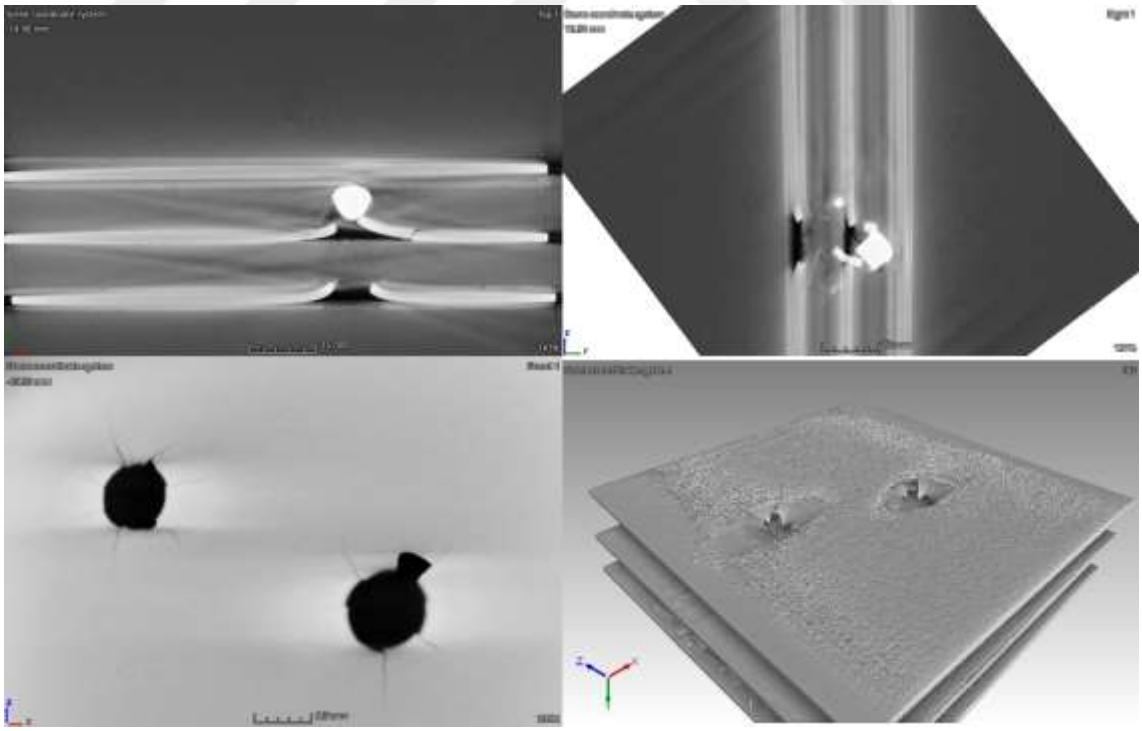
Şekil 3.4. 648m/s s Hıza Ait Yüksek Hızlı Kamera Görüntüsü



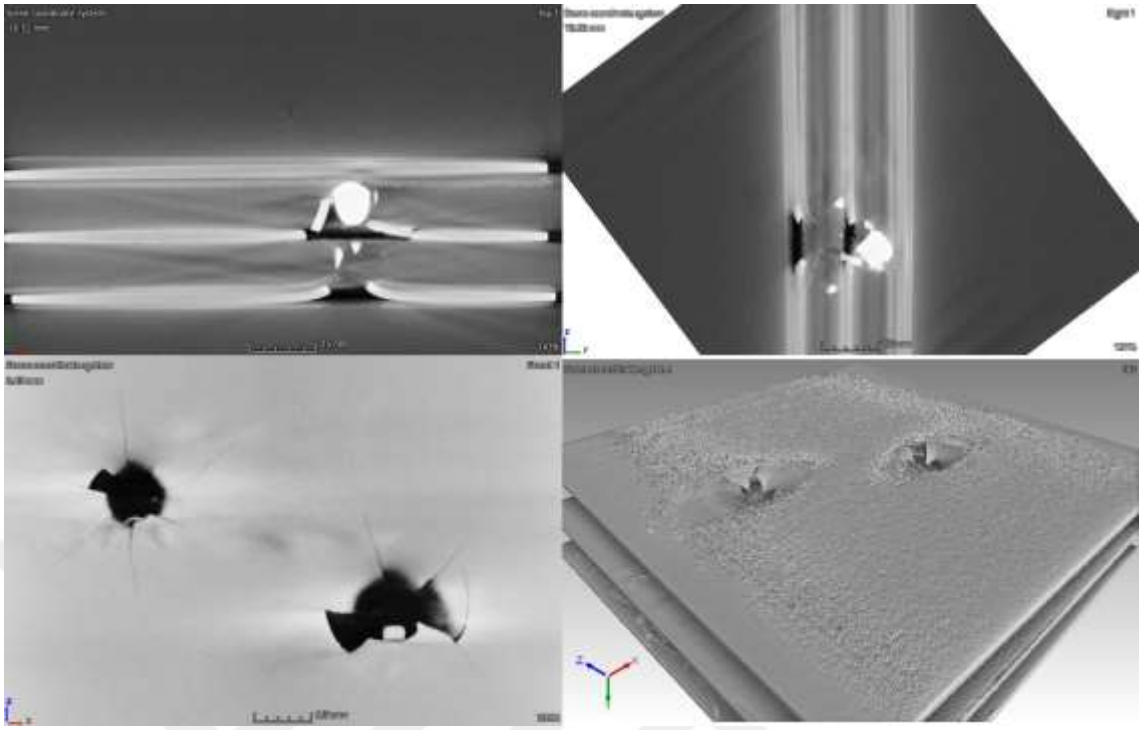
Şekil 3.5. 628 m/s mermi hızı için üst plaka referans alınmış numunenin tomografi (CT-Xray) görüntüsü



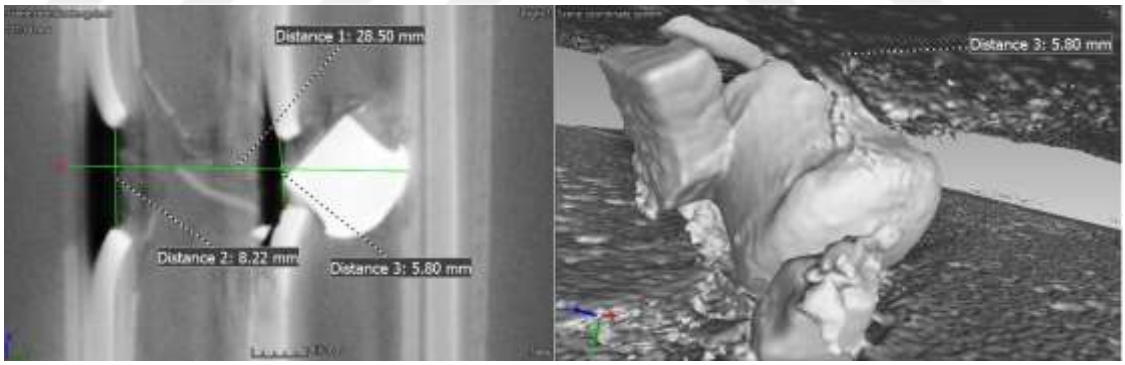
Şekil 3.6. 628 m/s mermi hızı için orta plaka referans alınmış numunenin tomografi (CT-Xray) görüntüsü



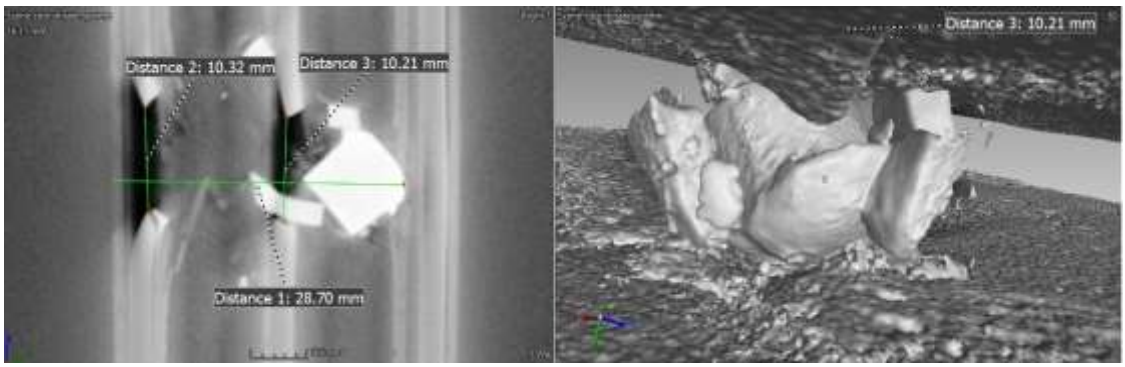
Şekil 3.7. 648 m/s mermi hızı için üst plaka referans alınmış numunenin tomografi (CT-Xray) görüntüsü



Şekil 3.8. 648 m/s mermi hızı için orta plaka referans alınmış numunenin tomografi (CT-Xray) görüntüsü



v=628 m/s



v=648 m/s

Şekil 3.9. 628 ve 648 m/s mermi hızları için mermi ilerlemesi ve plaka çatlaklarının ölçülmesi

Birinci numune ile yapılan balistik testte ilk atış 628m/s hız ile gerçekleşmiştir. Bu atışa ait yüksek hızlı kamera görüntüleri incelendiğinde numunenin arka yüzünde çıkış olmamakla birlikte numune ve sabitleyici aparat arasındaki boşluklar incelenerek arka yüzde elastik deformasyon olduğu görülmektedir.

Numunenin şekil 58 ve 59'da yer alan CT-Xray görüntüsü incelendiğinde mermi çekirdeğinin iki nitinol plakayı da delerek üçüncü plakayı delemediği görülmektedir. Şekil 62 incelendiğinde ise mermi çekirdeği ön yüzde yer alan plakaya 8,22 mm genişliğinde delinme oluştururken devamında yer alan plakada bu genişlik 5,8 mm olarak ölçülmüştür. Mermi çekirdeği ikinci plakayı geçtikten sonra atış ekseninden saparak yön değiştirmiştir. Toplamda 28,5 mm numune içersinde yol alan mermi çekirdeği son plakayı delememiş ve arka yüzden çıkış görülmemiştir.

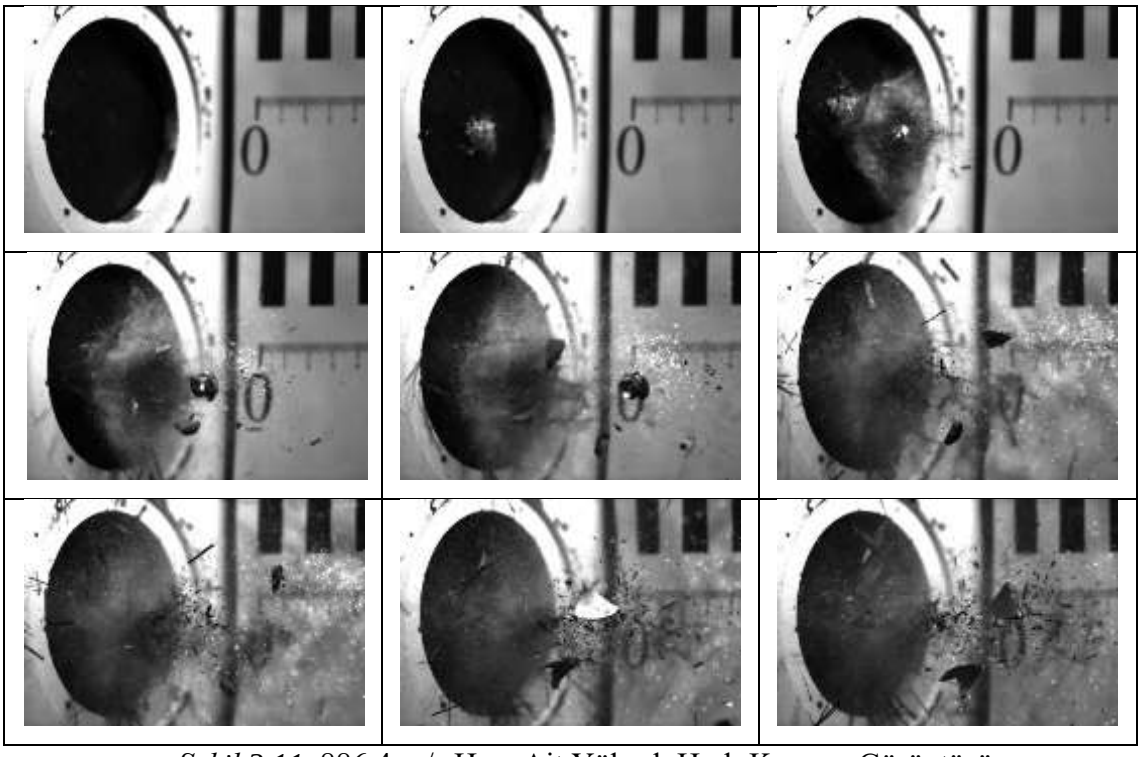
Birinci numuneye uzun namlulu bir tüfeğin atış hızına yakın hızlarda olan ikinci atış yapıldığında sonuç birinci atıştan pek farklı olmamıştır. Numunenin arka yüzünde elastik deformasyon meydana gelerek mermi çekirdeğinin numuneyi delemediği görülmüştür. Şekil 57'de yer alan görüntülerde numunenin arkasından kalkan tozlar görülmektedir.

Numunenin şekil 60 ve 61'de yer alan CT-Xray görüntüsü incelendiğinde mermi çekirdeğinin iki nitinol plakayı da delerek üçüncü plakayı delemediği görülmektedir. Bu atış ile çıkan sonuç ilk atışa göre plakada oluşan tahribatı arttırmıştır. Şekil 62 incelendiğinde mermi çekirdeği ön yüzde yer alan plakaya 10,32 mm genişliğinde delinme oluştururken devamında yer alan plakada bu genişlik 10,21 mm olarak ölçülmüştür. Mermi çekirdeği ikinci plakayı geçtikten sonra atış ekseninden saparak yön değiştirmiş ve deformasyona uğramıştır. Nitinol plakada kırıklara neden olan mermi çekirdeği toplamda 28,7 mm numune içersinde yol almıştır. Çekirdek son plakayı delememiş ve arka yüzden çıkış görülmemiştir. Numunenin arka yüzüne gelindiğinde ise herhangi delaminasyon görülmemiştir. Numune mermi çekirdeğini başarı ile tutmuştur.

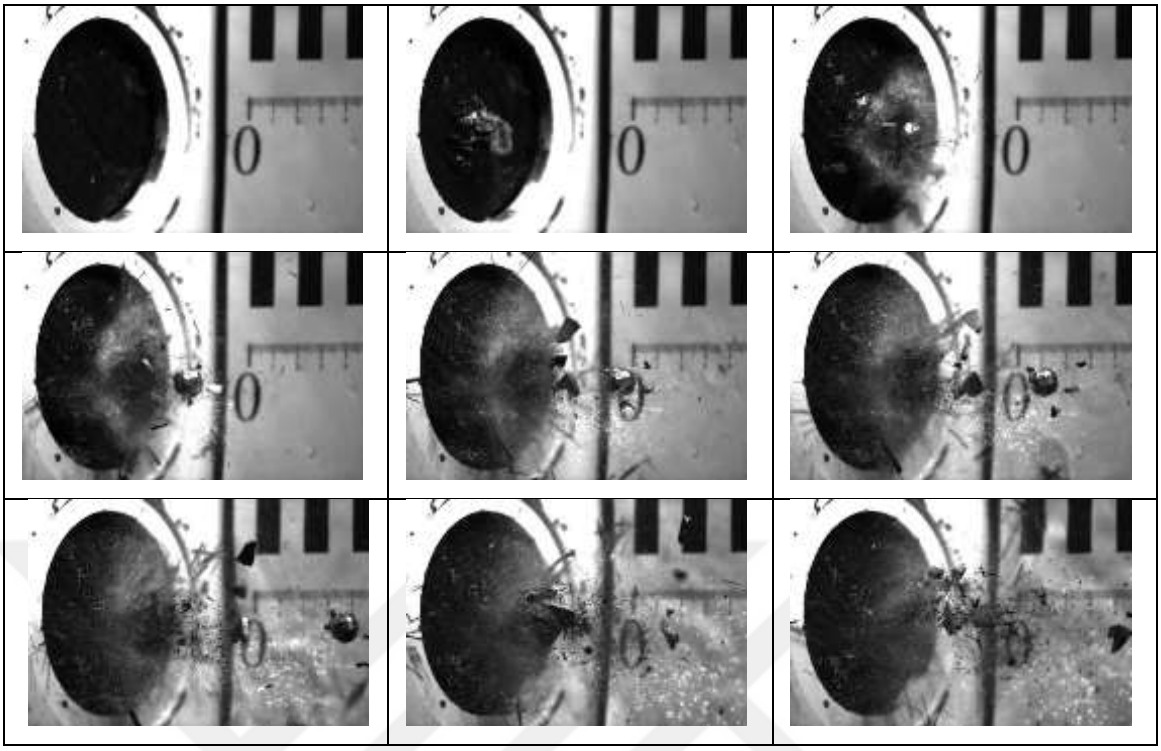


Şekil 3.10. İki Numaralı Numune Ön Yüzü

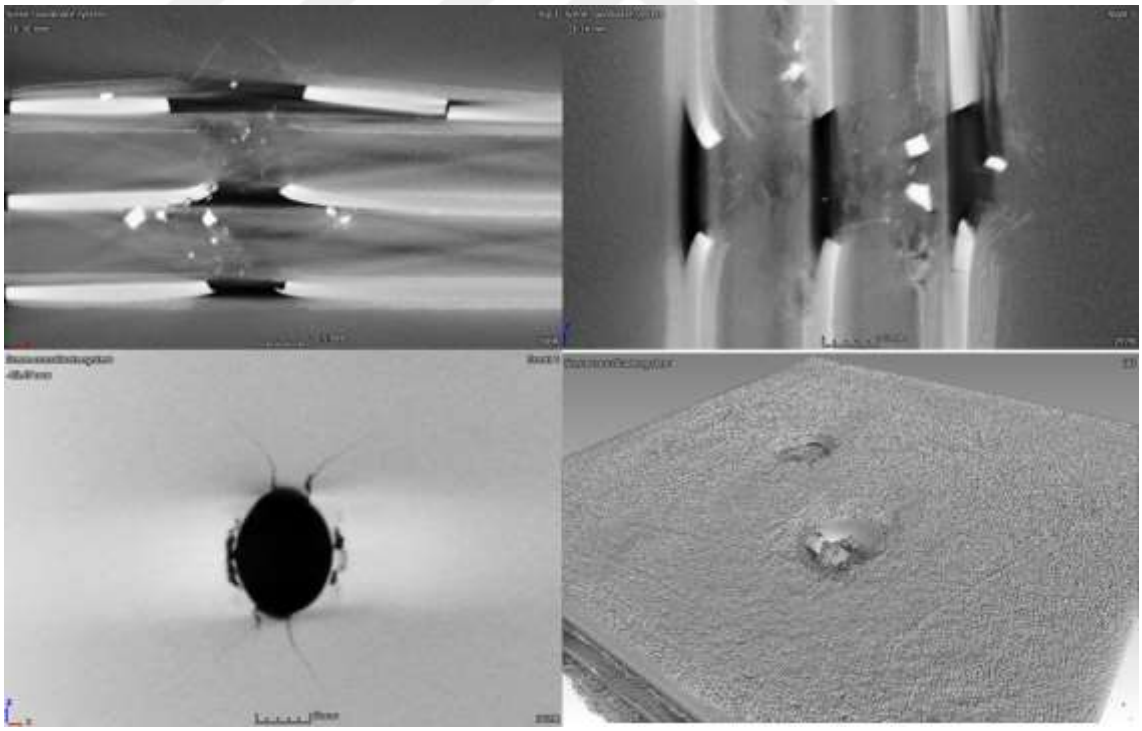
İki numaralı numuneye geçildiğinde gazlı atış silahının limitlerine yakın hızlara çıkarak mermi çıkışının görülmesi sağlanmıştır. 886,4m/s ile 890,2m/s hızlarında 2 atış yapılan numune incelenmiştir. Birinci numune ile aynı dizilime sahip ikinci numunede yer alan çekirdek izleri daha net görülmektedir. Yüksek hızın etkisi ile karbon fiber düzgün delinme görülmüştür.



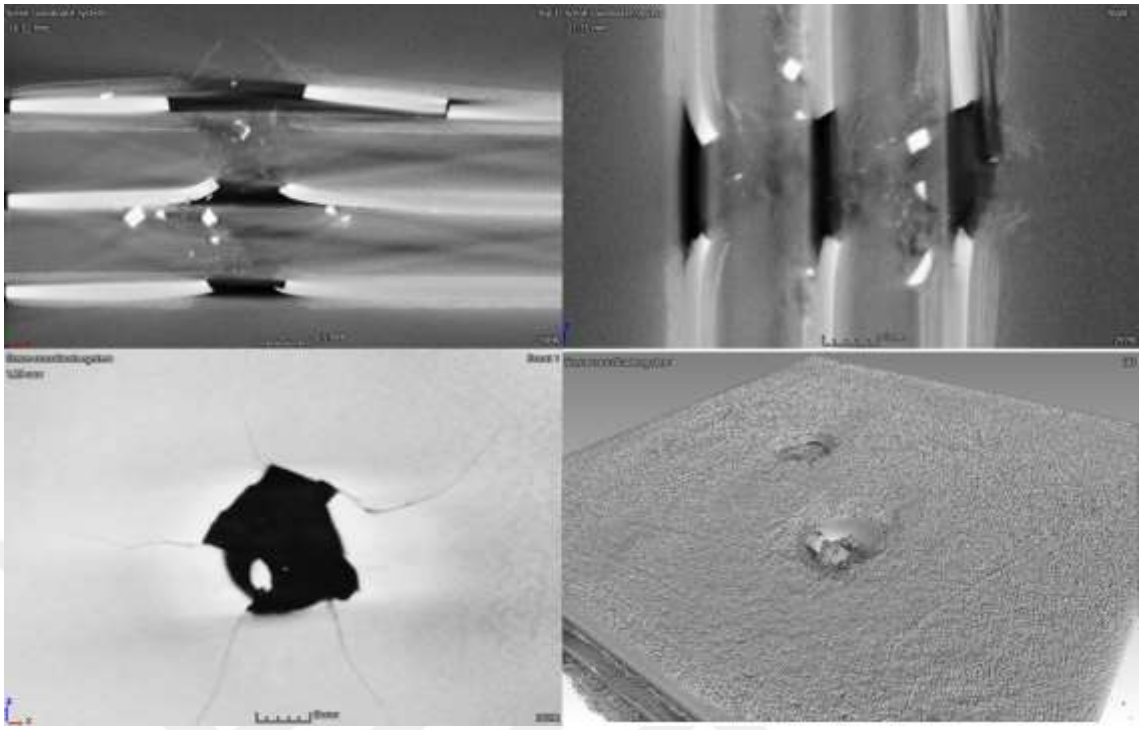
Şekil 3.11. 886,4 m/s Hıza Ait Yüksek Hızlı Kamera Görüntüsü



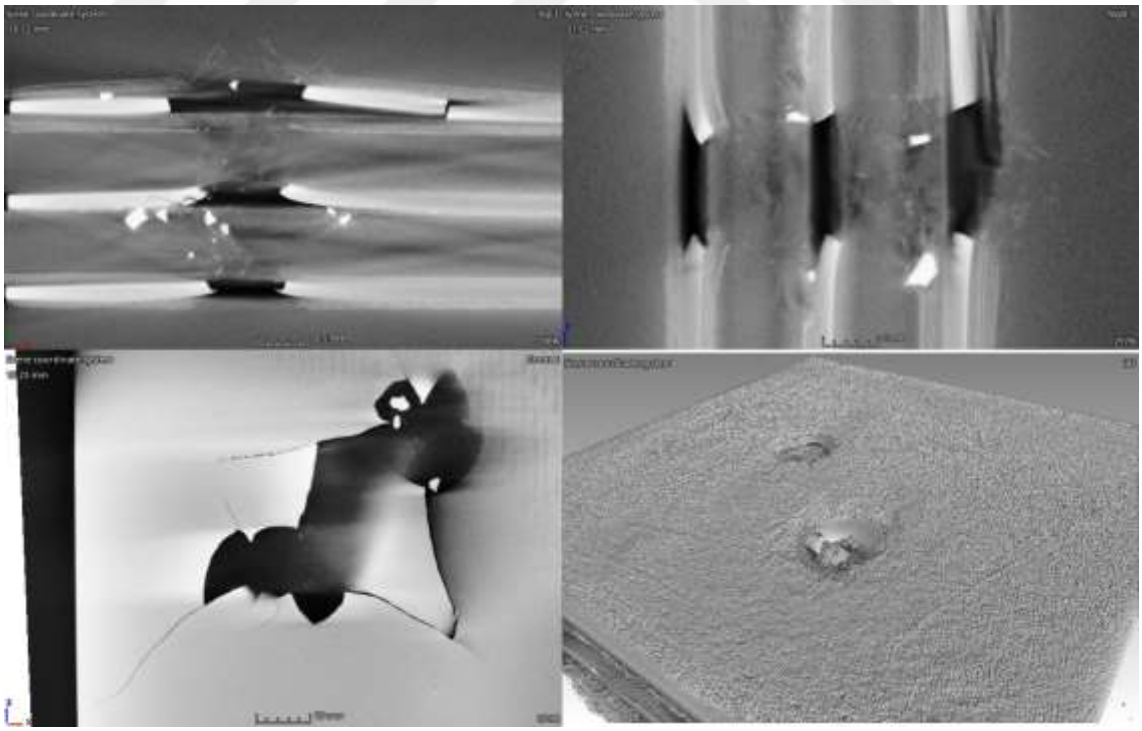
Şekil 3.12. 890,2 m/s Hıza Ait Yüksek Hızlı Kamera Görüntüsü



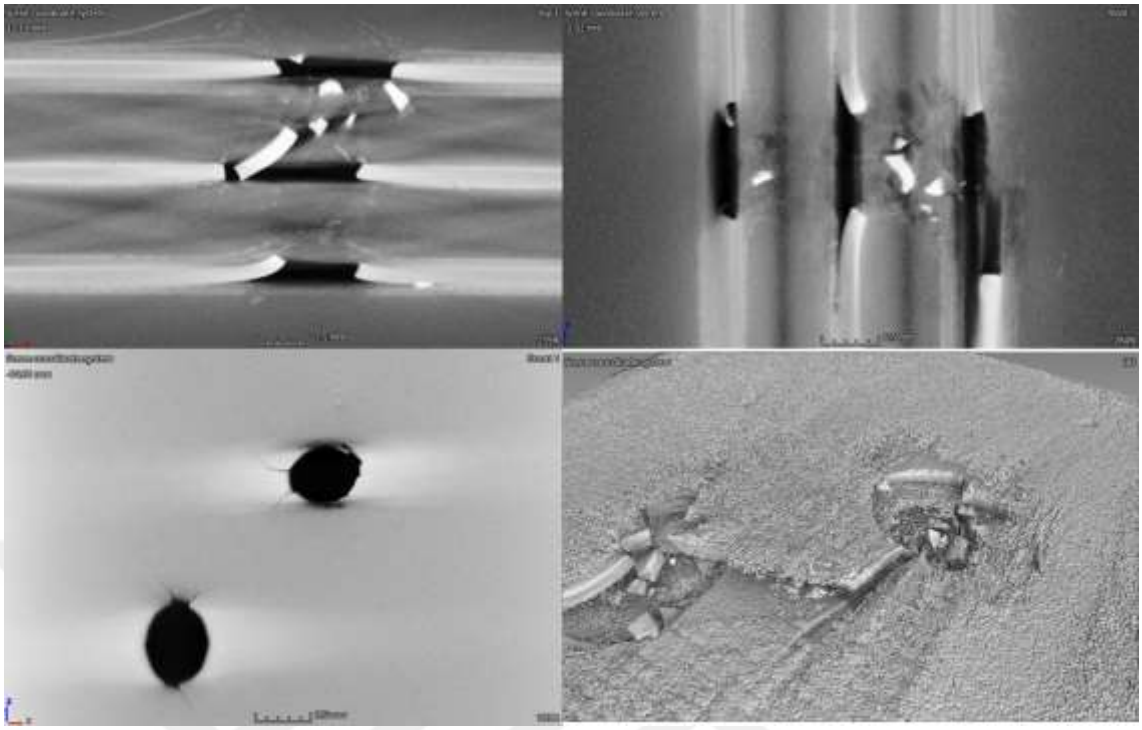
Şekil 3.13. 886 m/s mermi hızı için üst plaka referans alınmış numunenin tomografi (CT-Xray) görüntüsü



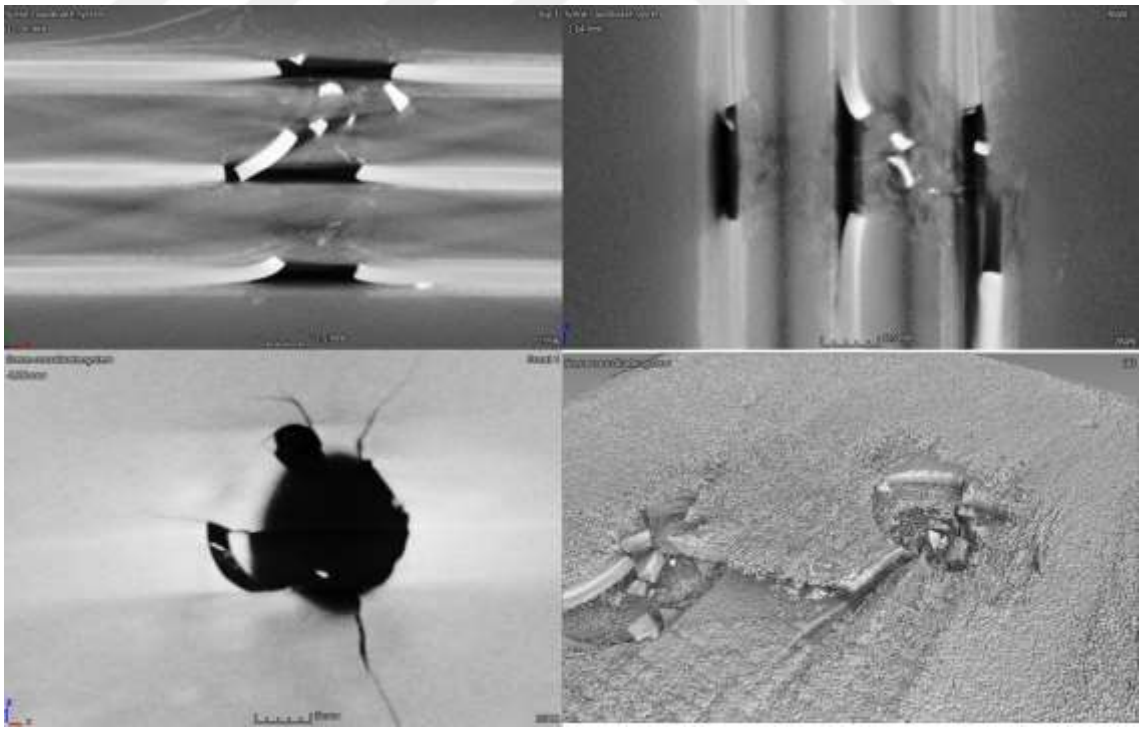
Şekil 3.14. 886 m/s mermi hızı için orta plaka referans alınmış numunenin tomografi (CT-Xray) görüntüsü



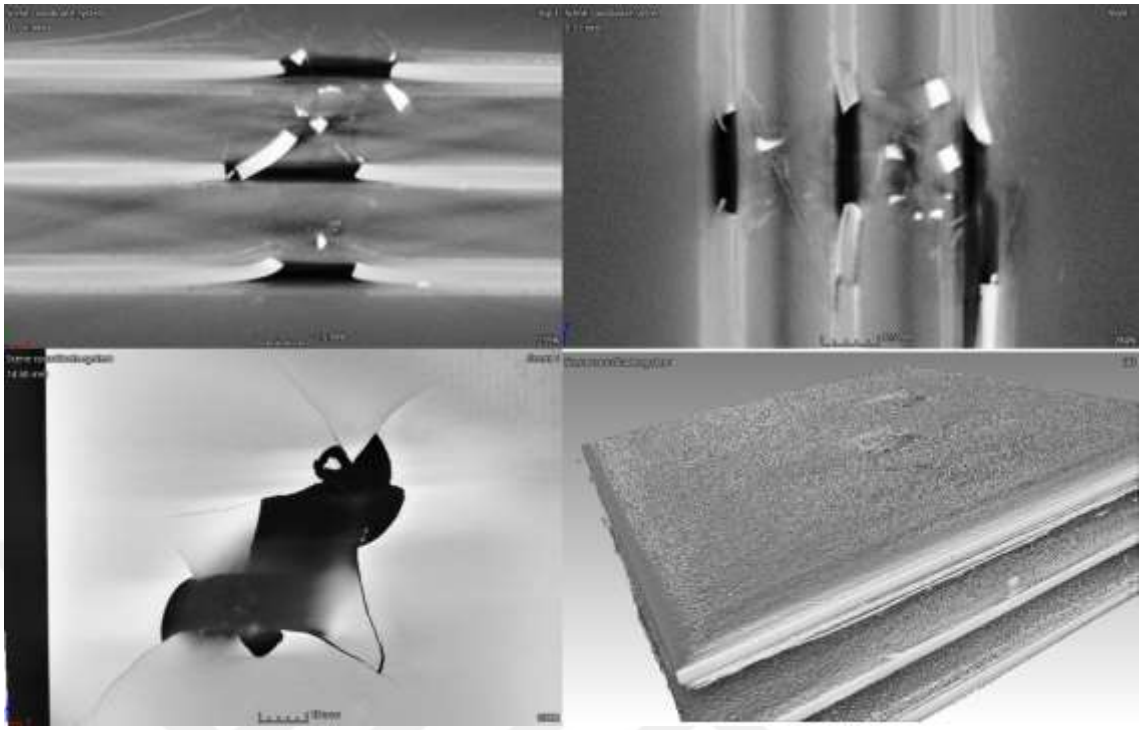
Şekil 3.15. 886 m/s mermi hızı için alt plaka referans alınmış numunenin tomografi (CT-Xray) görüntüsü



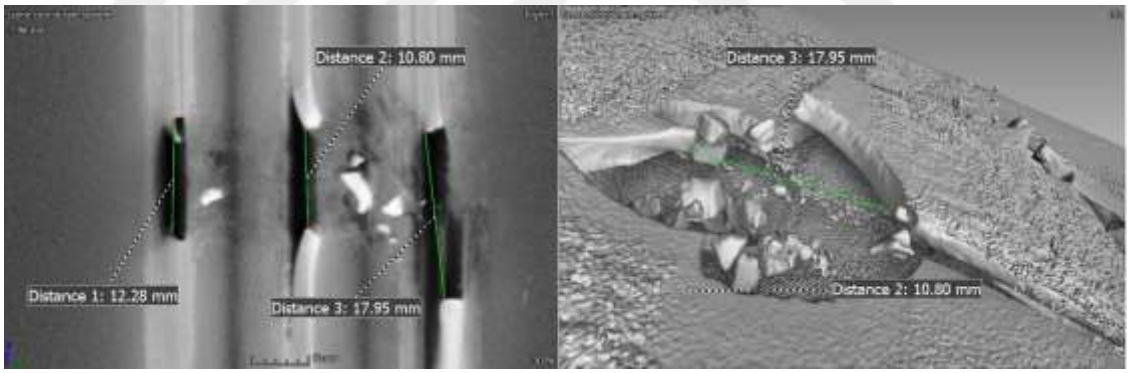
Şekil 3.16. 890 m/s mermi hızı için üst plaka referans alınmış numunenin tomografi (CT-Xray) görüntüsü



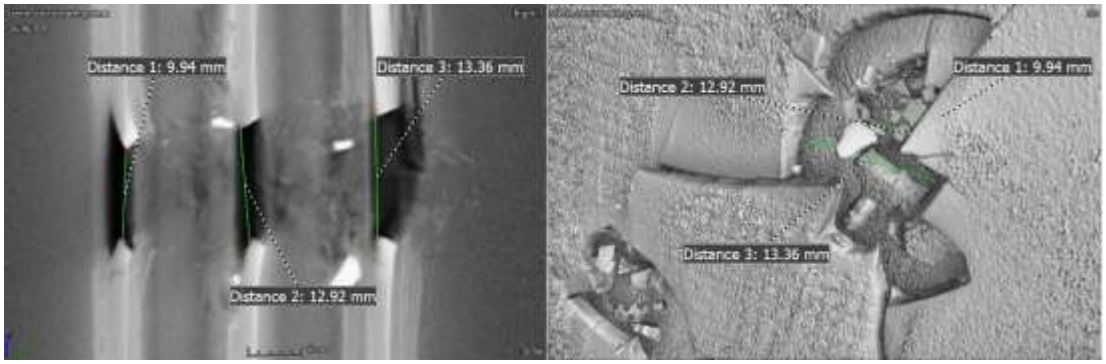
Şekil 3.17. 890 m/s mermi hızı için orta plaka referans alınmış numunenin tomografi (CT-Xray) görüntüsü



Şekil 3.18. 890 m/s mermi hızı için alt plaka referans alınmış numunenin tomografi (CT-Xray) görüntüsü



v=886 m/s



v=890 m/s

Şekil 3.19. 886 ve 890 m/s mermi hızları için mermi ilerlemesi ve plaka çatlaklarının ölçülmesi

İkinci numunenin testi gazlı atış silahının limitlerine yakın bir hız olan 886,4 m/s ile gerçekleşmiştir. İkinci numuneye uygulanan balistik test ile numunenin sınırlarını ve delinmesini gözlemleyerek balistik davranışı belirlenmeye çalışılmıştır.

Şekil 64 incelendiğinde delinen numune, mermi çekirdeğini yüksek oranda plastik deformasyona uğratmıştır. Numunede yer alan nitinol plakalarda ve katmanlı karbon fiber yapısında gevrek davranış neticesinde kırılmalar görülmüştür. Mermi çekirdeğinin çıkış hızı 255 m/s olarak ölçülmüştür.

Numunenin şekil 66, 67 ve 68'de yer alan CT-Xray görüntüsü incelendiğinde mermi çekirdeğinin üç nitinol plakayı da delerek numuneden çıkış yaptığı görülmektedir. Yüksek hızın etkisi ile ilk plakada delinme ve hafif çatlaklar görülürken orta plakada kırılma ve çatlamalarda büyüme görülmüştür. Son plakada ise büyük kırılmalar görülmektedir. Şekil 72 incelendiğinde mermi çekirdeği ön yüzde yer alan plakaya 12,28 mm genişliğinde delinme oluştururken devamında yer alan plakada bu genişlik 10,8 mm olarak ölçülmüştür. Son plakada genişlik 17,95 mm ölçüsüne çıkmıştır. Nitinol plakada kırıklara neden olan mermi çekirdeği numunenin arka yüzünden çıkmıştır.

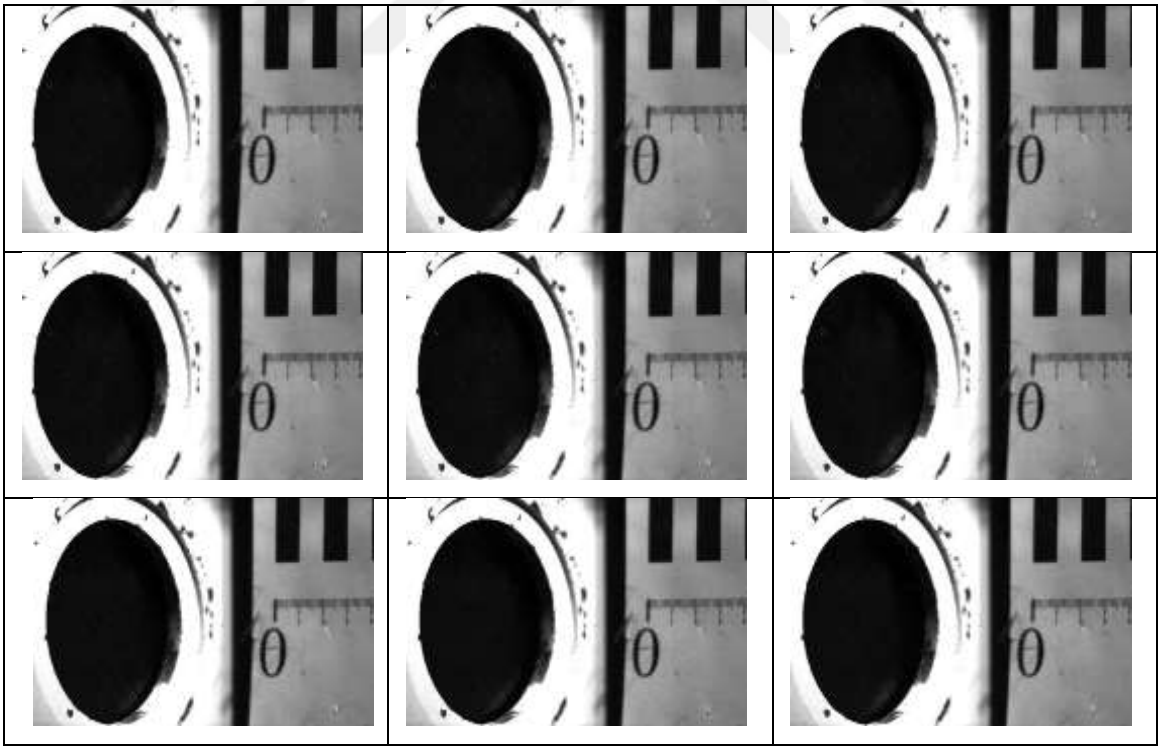
İkinci numuneye test kapsamında yapılan ikinci atış 890,2 m/s hıza ulaşmıştır. Patlama görüntüsüne benzer bir çıkışın görüldüğü numunede sonuçlar birinci atış ile benzer yapıdadır. Mermi çekirdeği yüksek oranda plastik deformasyona uğramıştır. Karbon fiber, mermi çekirdeğinin penetrasyonu neticesinde gevrek davranış sergileyerek fiber kırılmalarına uğramıştır. Numunenin yapısında yer alan nitinol plaka parçaları Şekil 65'de görülmektedir. Süperelastik bir metal olan nitinol plakada gevrek davranış gözlemlenmiştir. Mermi çekirdeğinin çıkış hızı 216 m/s olarak ölçülmüştür. Atış hızı artarken çıkış hızının azalmasının sebebi, ikinci atışta mermi çekirdeğinin numune içinde aldığı yolun uzaması, çıkış hızının azalmasıdır.

Numunenin şekil 69, 70 ve 71'de yer alan CT-Xray görüntüsü mermi çekirdeğinin üç nitinol plakayı da delerek numuneden çıkış yaptığı görülmektedir. Yüksek hızın etkisi ile ilk atışa benzer sonuçlar görülmektedir. İlk plakada delinme ve hafif çatlaklar görülürken orta plakada kırılma ve çatlamalarda büyüme görülmüştür. Son plakada ise büyük kırılmalar görülmektedir. Şekil 72 incelendiğinde mermi çekirdeği ön yüzde yer alan plakaya 9,94 mm genişliğinde delinme oluştururken devamında yer alan plakada bu genişlik 12,92 mm olarak ölçülmüştür. Son plakada genişlik 13,36 mm ölçüsüne çıkmıştır. Nitinol plakada kırıklara neden olan mermi çekirdeği numunenin arka yüzünden çıkmıştır.

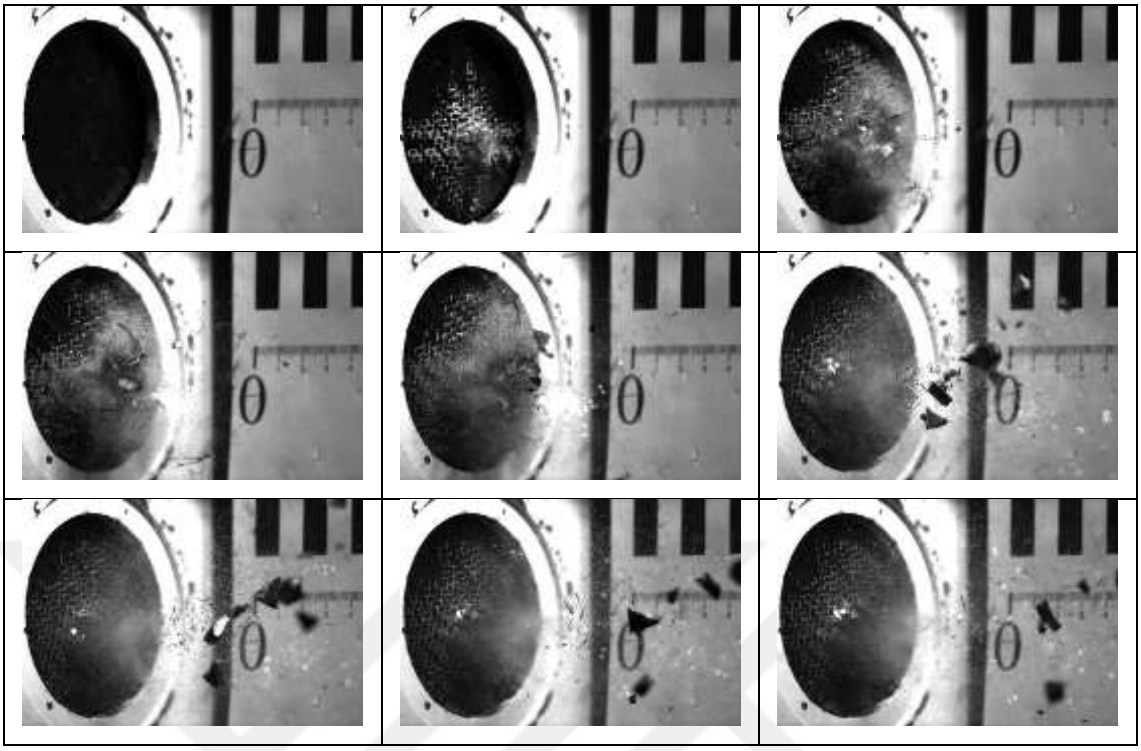


Şekil 3.20. Üç Numaralı Numune Ön Yüzü

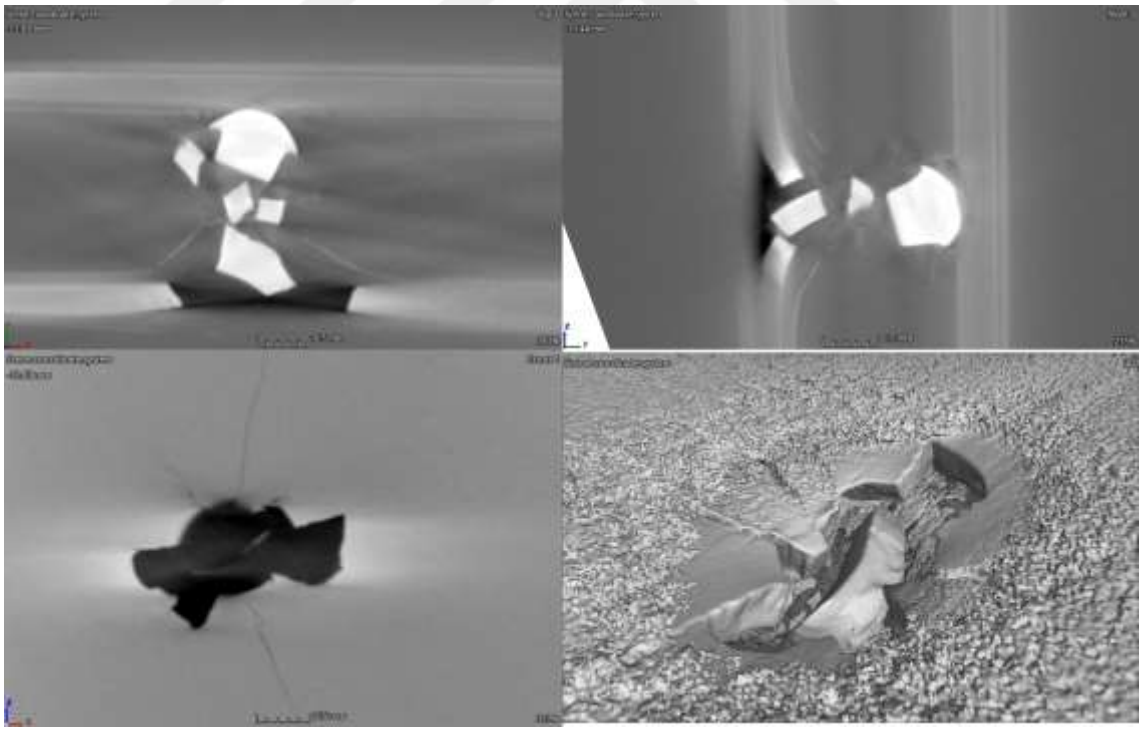
Üçüncü deneyde her yüzünde 4 adet karbon prepreg bulunan 3mm kalınlığında 2 adet nitinol plaka, 1 adet 20mm kalınlıkta PVC köpük kullanılmıştır. Numunelerin hepsinde toplam kalınlık aynı kalmıştır.



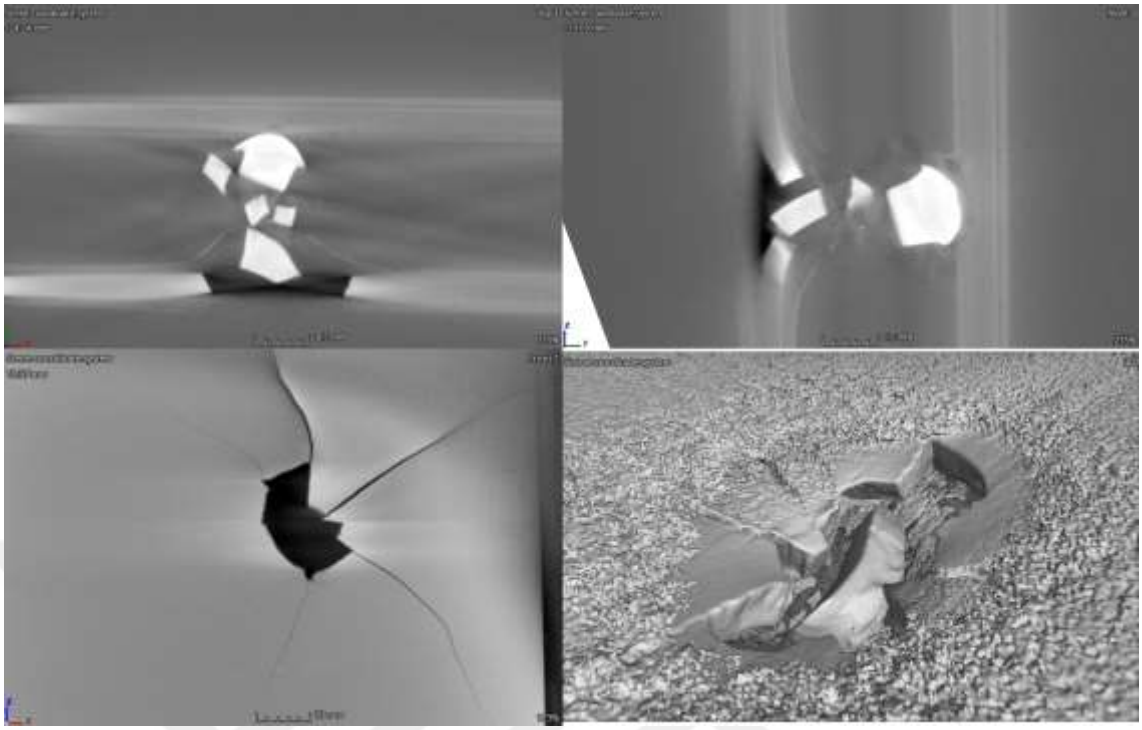
Şekil 3.21. 659,9 m/s Hıza Ait Yüksek Hızlı Kamera Görüntüsü



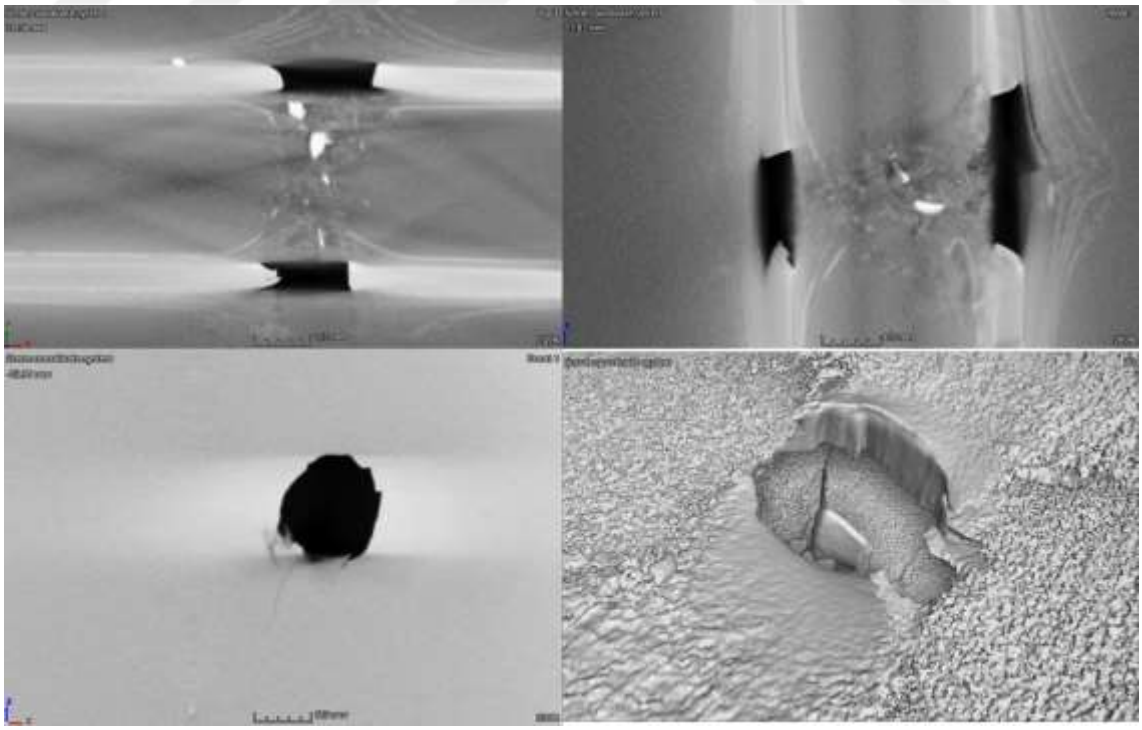
Şekil 3.22. 889,6 m/s Hıza Ait Yüksek Hızlı Kamera Görüntüsü



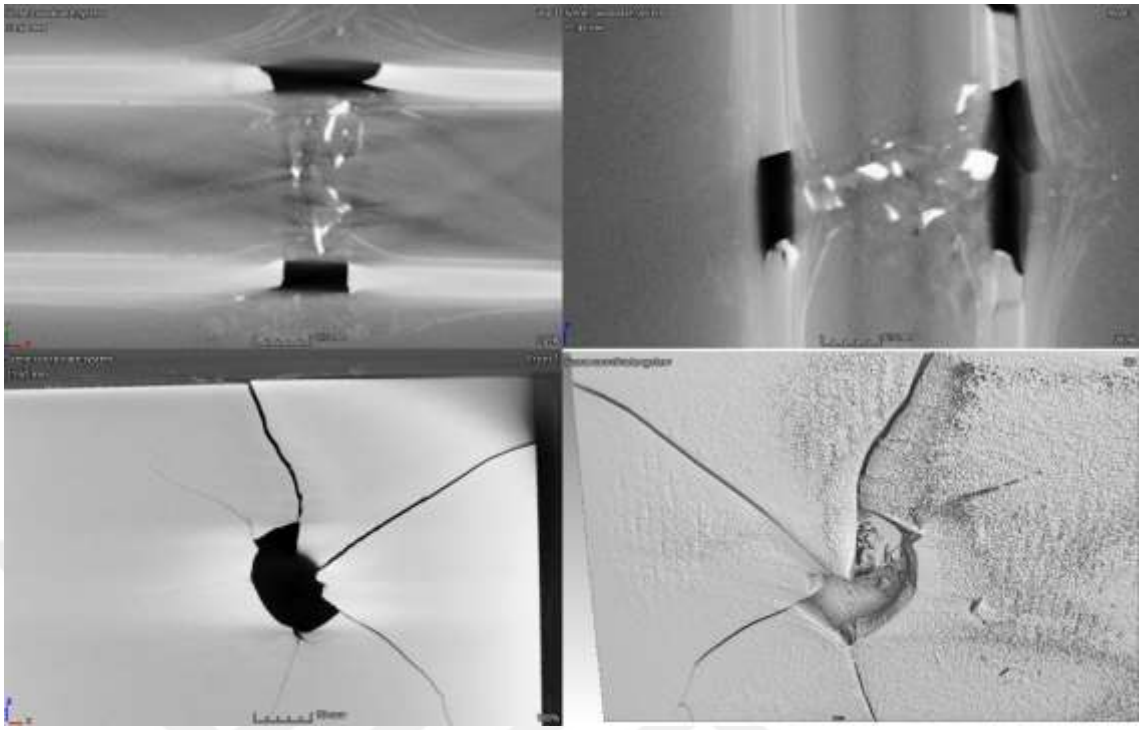
Şekil 3.23. 660 m/s mermi hızı için üst plaka referans alınmış numunenin tomografi (CT-Xray) görüntüsü



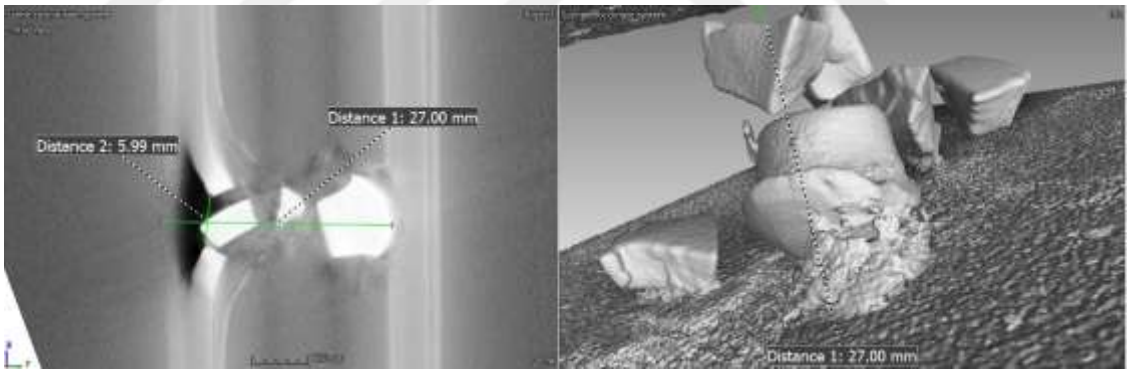
Şekil 3.24. 660 m/s mermi hızı için alt plaka referans alınmış numunenin tomografi (CT-Xray) görüntüsü



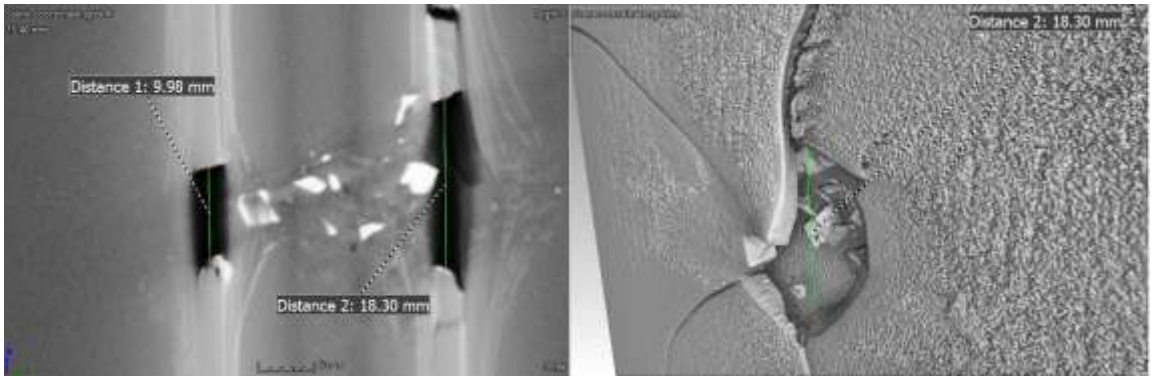
Şekil 3.25. 890 m/s mermi hızı için üst plaka referans alınmış numunenin tomografi (CT-Xray) görüntüsü



Şekil 3.26. 890 m/s mermi hızı için alt plaka referans alınmış numunenin tomografi (CT-Xray) görüntüsü



v=640 m/s



v=890 m/s

Şekil 3.27. 660 ve 890 m/s mermi hızları için mermi ilerlemesi ve plaka çatlaklarının ölçülmesi

Deney numunesine 2 farklı hızda atış yapılmıştır. 659,9m/s ile 889,6m/s hızlarında yapılan atışlarda çekirdek girişi incelenmiştir. Numune incelendiğinde gevrek karbon fiber ile daha kalın nitinol plakadan kaynaklı olarak mermi çekirdeği girişte daha yüksek deformasyona uğramaktadır. Karbon fiber yüzde kırıklar oluşmuştur.

Numunenin arka yüzü incelendiğinde 659,9m/s hızla atılan mermi çekirdeği numunenin içinde kalırken, 889,6m/s hızla atılan mermi çekirdeğinin çıkış yaptığı görülmektedir. Çıkış hızı 90 m/s olarak ölçülen numunede delaminasyon meydana gelmiştir.

İki numune ile toplam kalınlığı aynı tutulurken 3mm nitinol plaka kalınlığına sahip üçüncü numuneye iki farklı hızda balistik test uygulanmıştır. İlk atışta 659,9 m/s hız ile numuneye gönderilen çekirdek diğer numunelerde olduğu gibi delinme sağlamamıştır. Mermi çekirdeği numunenin içinde kalmıştır. Numunenin arka yüzünden elastik deformasyon oluşturmuştur.

Numunenin şekil 76 ve 77'de yer alan CT-Xray görüntüsü incelendiğinde mermi çekirdeğinin ilk nitinol plakayı deldikten sonra ikinci plakayı delemediği görülmektedir. Şekil 80 incelendiğinde mermi çekirdeği ön yüzde yer alan plakaya 5,99 mm genişliğinde delinme olarak ölçülmüştür. Mermi çekirdeği birinci plakayı geçtikten sonra atış ekseninden saparak yön değiştirmiş ve deformasyona uğramıştır. Nitinol plakada kırıklara neden olan mermi çekirdeği toplamda 27 mm numune içersinde yol almıştır. Çekirdek son plakayı delmemiş ve arka yüzden çıkış görülmemiştir.. Numune mermi çekirdeğini başarı ile tutmuştur.

Üçüncü numuneye yapılan ikinci atışta balistik sınırları görmek için atış hızı yükseltilmiştir. Gazlı atış silahının limitlerine yakın bir hız olan 889,6 m/s ile hedefe gönderilen mermi çekirdeği numunenin arka yüzünden çıkmıştır. Mermi çekirdeği yüksek oranda plastik deformasyona uğramıştır. Nitinol plaka gevrek davranış göstererek kırılmış ve mermi çekirdeği ile dışarı saçılmıştır. Üçüncü numunede yer alan karbon fiber kırıkları daha düşük seviyede olduğu görülmektedir. Kırılan fiber parçaları şekil 75'de yer almaktadır.

Numunenin şekil 78 ve 79'da yer alan CT-Xray görüntüsü incelendiğinde mermi çekirdeğinin üst plakayı deldikten sonra alt plakada da delik oluşturduğu görülmektedir. Hızın etkisi ile plakada kırılmalar görülmüştür. Şekil 80 incelendiğinde mermi çekirdeği ön yüzde yer alan plakaya 9,98 mm genişliğinde, arka yüzde yer alan plakada ise 18,3 mm olarak ölçülmüştür. Nitinol plakada kırıklara neden olan mermi çekirdeği son plakayı delmiş ve arka yüzden çıkış görülmüştür.

4. BÖLÜM

TARTIŞMA-SONUÇ ve ÖNERİLER

4.1.Sonuçlar

Bu çalışmada nitinol-fiber kompozit plakalı kompozitlerin balistik davranışı incelenmiştir. Numuneler kompozit malzeme Erciyes Üniversitesi Makine Mühendisliği kompozit laboratuarında üretilmiştir. Balistik performans deneyleri Erciyes Üniversitesi Makine Mühendisliği laboratuarlarında bulunan ekipmanlar ile gerçekleştirilmiştir. Gazlı atış silahı, led aydınlatma ve yüksek hızlı kameraların kullanıldığı deneylerde 3 adet numune kullanılarak 6 adet atış gerçekleştirilmiştir. Atışlarda STANAG 2920 (NATO STANAG 2920,2003) ve MIL-DTL-46593B (MR) (MIL-DTL-46593B,2008 standartlarında AISI 4340H çeliğinden üretilmiş FSP mermi çekirdeği kullanılarak numune üzerinde balistik etkiler incelenmiştir.

Deneyde kullanılan birinci ve ikinci numunede her yüzünde 4 kat karbon prepreg bulunan 2 adet 2mm nitinol plaka ve ortasında 1 adet nitinol plaka bulunan çift kat PVC köpük kullanılmıştır. Üçüncü numunede ise her yüzünde 4 adet karbon prepreg bulunan 2 adet 3mm kalınlığa sahip nitinol plaka ve tek katlı PVC köpük kullanılmıştır. 3 numuneye ait kalınlık değiştirilmeden balistik test yapılmıştır.

Gazlı atış silahına yerleştirilen her numuneye 2 adet atış gerçekleştirilmiştir. İlk numunede balistik test 628m/s ve 648m/s hızlarında gerçekleştirilmiştir. Bu numunede herhangi çıkış görülmezken arka yüzde elastik deformasyon olmuştur. Mermi çekirdeği iki atışta da ilk iki nitinol plakayı geçerek delerek yön değiştirmiş ve numune içersinde kalmıştır. 628 m/s hıza ait atışta mermi çekirdeği 28,5 mm numunede yol alırken 648 m/s hıza ait atışta mermi çekirdeği 28,7 mm numune içinde yol almıştır.

İkinci numunede balistik test 886,4 m/s ve 890,2 m/s hız ile gerçekleştirilmiştir. Her iki atışta mermi çekirdekleri numuneyi delerek arka yüzden çıkmıştır. 886,4 m/s hız ile atılan mermi çekirdeği 255 m/s hız ile çıkış yaparken 890,2 m/s hız ile atılan mermi çekirdeği 210 m/s hız ile çıkış yapmıştır. Atış hızı artarken çıkış hızının azalmasının nedeni ilk atıştan sonra deforme olan numunede mermi çekirdeğinin aldığı yolun uzamasıdır. Atış hızı yükseldiğinde numuneye etki eden gerilme dalgalarının arka yüze tamamen iletilmesi neticesinde patlama olduğu görülmektedir.

Üçüncü numunede ise balistik test 659,9 m/s ve 889,6 m/s hız ile gerçekleştirilmiştir. İlk atışta mermi çekirdeği numunenin arka yüzünde elastik deformasyona neden olmuştur. Ön yüzde yer alan nitinol plakayı delen mermi çekirdeği ikinci plakada yön değiştirmiş ve numune içersinde kalmıştır. Mermi çekirdeği numune içersinde 27 mm yol almıştır. İkinci atışta ise mermi çekirdeği numuneyi delerek arka yüzden çıkış yapmıştır. Çarpmanın etkisi ile mermi çekirdeği plastik deformasyona uğramıştır. Çıkış hızı 90 m/s olarak ölçülen numunede delaminasyon meydana gelmiştir.

Yapılan deneyin yüksek kare hızında kayıt edilen görüntüleri ve ct xray görüntüleri incelediğinde 2 adet 3mm nitinol plakaya sahip üçüncü numunenin, 3 adet 2mm nitinol plakaya sahip çift sandviç yapılı iki numuneden daha iyi balistik performans gösterdiği görülmektedir. Deneyler öncesinde incelenen çalışmalarda 2mm plakaya sahip numunelerin, 3mm plakalı numuneden yüksek balistik performansa sahip olması beklenmiştir. Ancak bu çalışmada nitinol plakanın kalın olduğu üçüncü numune yüksek balistik performans göstermiştir.

Süperelastisiteye sahip nitinolde, balistik test sonucu kırılma ve çatlamalar meydana gelmiştir. Nitinol plaka elastik sınırın üzerine çıkıldığında gevrek bir malzeme gibi davranarak seramik etkisi göstermiştir. Yapı tekrarlı atışlarda mermiyi absorbe edecek şekildedir. Çıkış hızları klasik kompozitlere göre nispeten düşük sonuç vermiştir.

KAYNAKÇA

1. Özgültekin, S., 2012. Balistik Zırhlarda Kullanılan Kompozit Malzeme Kombinasyonlarının İncelmesi. Sakarya Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya, 1-57 s.
2. Başbuğ, F., 2012. Mekanik Alın Birleştirilmiş Kompozit Plakaların Üç Nokta Eğilme Testleri İle Mekanik Davranışlarının İncelenmesi. Pamukkale Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Denizli, 22-23 s.
3. Bitlisli, B., 2019. Zırhlı Araçlarda Kullanılan Kompozit Zırh Malzemelerinin Balistik Performansının İncelenmesi. Bursa Uludağ Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Bursa, 2-3 s.
4. Asi, D., 2018. Polimer Matrisli Kompozit Malzemelerde İlave Olarak Kullanılan Parçacıkların Geometrisinin Kompozit Malzemelerin Fiziksel Ve Mekaniksel Özelliklerine Etkisinin Araştırılması. Uşak Üniversitesi, Doktora Tezi, Uşak, 22-37 s.
5. Öztürk, K., 2020. Alüminyum Matrisli Melez Kompozit Üretimi Ve Karakterizasyonu. Yıldız Teknik Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 6-42 s.
6. Deniz, M., 2005. Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri Ve Isıl İşlemle Presleme Tekniğini Kullanarak Kompozit Malzeme Üretecek Bir Düzeneğin Tasarım Ve İmalatı. Harran Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Şanlıurfa, 9-28 s.
7. Kısasöz, A., 2018. Alüminyum Matrisli Titanyumdiborür İn Situ Takviyeli Kompozitlerin Üretimi Ve Karakterizasyonu. Yıldız Teknik Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 36-40 s.
8. Jahromi, S., 2018. the production and sustainable role of pardicle composites in engineering structures. *International Congress on Engineering Science and Sustainable Urban Development*, 2018, Denmark, Islamic Azad University, 12 pp.
9. Pul, M.,2019. farklı yöntemler ile üretilen MgO takviyeli alüminyum kompozitlerde mekanik davranışların karşılaştırılması. **Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 34** (2)**:** 255-265

10. Söyler**,** M**.,** 2007**.** Toz Metalurjisi Ve Uygulamaları. Gebze İleri teknoloji Entitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli, 28-41 s.
11. Ünal**,** R., 2007. Toz Metalurjisi. (Web sayfası: **https://rahmiunal.net/toz/powdermet.html),** (Erişim tarihi: Aralık 2022).
12. Ünal**,** R., 2007. Toz Metalurjisi. (Web sayfası: **https://rahmiunal.net/toz/powdermet.html),** (Erişim tarihi: Aralık 2022).
13. Kaplan, M., kompozit üretim yöntemleri.(Web sayfası: **http://tekstilteknik.blogspot.com/p/kompozit-uretim-yontemleri.html)**, (Erişim tarihi: Aralık 2022).
14. Durgun**,** İ**.,** 2014. el yatırma yöntemi ile kompozit parça üretimi**,** 1-2. *7. Mühendislik ve Teknoloji Sempozyumu,* 2014**,** Ankara, Çankaya Üniversitesi, 283-284 s.
15. Kaplan, M., kompozit üretim yöntemleri.(Web sayfası: **http://tekstilteknik.blogspot.com/p/kompozit-uretim-yontemleri.html),** (Erişim tarihi: Aralık 2022).
16. Enşici**,** A., 2004. polimer esaslı kompozit malzemeler ve ürün tasarımında kullanımları. (Web sayfası: **http://www.turkcadcam.net/rapor/kompozit-malzemeler/index3.html),**
17. Karslı**,** M**.,** 2016**.** Hafif Silahlar İçin Polimer Kompozit Malzeme Seçimi. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Trabzon, 23 s.
18. Turgut, T.,2007. vakum torbalama yöntemi ile kompozit malzemeden yapı üretimi örnek bir havacılık uygulaması. **Mühendis Ve Makine Dergisi, 48** (566)**:** 14-21
19. Haskılıç**,** V.**,** 2019**.** Kompozit Üretiminde Otoklav Yükleme Ve Çizelgeleme İçin Yeni Bir Model Önerisi: Savunma Sanayii Uygulaması. Hacettepe Üniversitesi, Doktora Tezi, Kayseri, 3 s.
20. Işık**,** A**.,** 2008**.** Kompozit malzemeden imal edilmiş bir takviye elemanının eğilme ve burulma yükü altında deneysel ve sayısal olarak incelenmesi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 24-45 s.
21. Akdoğan Eker**,** A., 2014. plastik matrisli kompozitler. **(Web sayfası: https://docplayer.biz.tr/32390798-Plastik-matrisli-kompozitler-prof-dr-aysegul-akdogan-eker.html),** (Erişim tarihi: Aralık 2022).
22. Kaplan, M.,2017. otomotiv endüstrisinde reçine transfer kalıplama (RTM): güncel gelişmeler ve başarılı uygulamalar. **Bartın Üniversitesi Mühendislik Ve Teknoloji Bilimleri Dergisi, 5** (1)**:** 47-53

23. Togulga, M., Tanoğlu, M. kompozit malzemeler ve jeotermal uygulamaları, 1-12. *VI. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi (Teskon),* 2003**,** Kültürpark Fuar Alanı İzmir, TMMOB, Makina Mühendisleri Odası, 407-419 s.
24. Baştürk, S., Tanoğlu**,** M.,2012. Mechanical behavior of fiber reinforced polymer / metal laminate and aluminum foam sandwich composites. **Usak University Journal of Material Sciences, 1** (2012): 59-70.
25. Mohammad, A., Nia, A.,2020. high-velocity impact behavior of sandwich structures with al faces and foam cores—experimental and numerical study. **Aerospace Science and Technology, 105** (2020)**:** 106039
26. Garcia-Avila, M., Portanova, M., Rabiei, A.,2014. ballistic performance of a composite metal foam-ceramic armor system. **Procedia Materials Science, 4** (2014)**:** 151-156
27. Braga, F., Milanezia, T., Monteiroa, S., Louroa, L., Gomesa, A., Jr, E.,2018. ballistic comparison between epoxy-ramie and epoxy-aramid composites in multilayered armor systems. **Journal of Materials Research and Technology, 7** (4)**:** 541-549
28. Bhat, A., Naveen, J., Jawaid, M., Norrrahim, M., Rashedi, A., Khan, A.,2021. advancement in fiber reinforced polymer, metal alloys and multi-layered armour systems for ballistic applications. **Journal of Materials Research and Technology, 15:** 1300-1317
29. Xie, W., Zhang, W., Kuang, N., Li, D., Huang, W., Gao, Y., Ye, N., Guo, L., Ren, P.,2016. experimental investigation of normal and oblique impacts on CFRPs by high velocity steel sphere. **Composites Part B: Engineering, 99:** 483-493
30. Ansari, M., Chakrabarti**,** A., Iqbal, M.A.**,**2017. an experimental and finite element investigation of the ballistic performance of laminated GFRP composite target. **Composites Part B: Engineering, 125**: 211-226.
31. Uçak**,** Y. M**.,** 2018**.** Tabakalı Karbon Elyaf Kompozit Malzemelerde Nano Boyutta Sic, Nio, Kil Ve Karbon Tüp Partikül Katkılarının Mekanik Özelliklere Etkisi. Tez Pamukkale Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Denizli, Sayfa sayısı 1-49 s.
32. Kıyak**,** B**.,** 2017**.** Karbon Fiber Kompozit Çekirdekli Sandviç Levhaların İmalatı Ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması. Fırat Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Elazığ, Sayfa sayısı 1-128 s.

33. Bozdoğan, F., Üngün**,** S., Temel, E**.,** Süpüren Mengüç, G.,2015. Balistik koruma amaçlı kullanılan tekstil materyalleri, Özellikleri Ve Balistik Performans Testleri. **Journal of Textiles and Engineer, 22** (98): 84-103.
34. Liu, C., Zhang**,** Y.X., Ye, L**.,**2016. High velocity impact responses of sandwich panels with metal fibre laminate skins and aluminium foam core. **International Journal of Impact Engineering, 100**: 139-153.
35. Yaghoubi, A. S., Liaw**,** B.,2012 Thickness influence on ballistic impact behaviors of GLARE 5 fiber-metal laminated beams: Experimental and numerical studies. **Composite Structures, 94** (8): 2585-2598.
36. Liu, C., Zhang**,** Y.X., Li, Jing.,2017. Impact responses of sandwich panels with fibre metal laminate skins and aluminium foam core. **Composite Structures, 182**: 183-190.
37. Mohammadkhani, P., Jalali**,** S.S., Safarabadi, M**.,**2021. Experimental and numerical investigation of low-velocity impact on steel wire reinforced foam core/composite skin sandwich panels. **Composite Structures, 256**: 112992.
38. Kosedag, E., Aydin**,** M., Ekici, R**.,**2021. Effect of stacking sequence and metal volume fraction on the ballistic impact behaviors of arall fiber-metal laminates: an experimental study. **Polymer Composites, 43** (11): 1-10.
39. Caliskan, U., Apalak**,** M. K.,2020. The response of pin-clamped carbon fibre-reinforced plastics composite sandwich beams with polyvinylchloride foam core under bending impact. **Journal of Reinforced Plastics and Composites, 39** (9-10): 384-405.
40. Zhang, Y., Dong**,** H., Liang, K**.,** Huang, Y.,2021. Impact simulation and ballistic analysis of B4C composite armour based on target plate tests. **Ceramics International, 47** (2021): 10035-10049.
41. Hu, P., Cheng**,** Y., Zhang, P**.,** Liu, J., Yang , H., Chen, J.,2021. A metal/UHMWPE/SiC multi-layered composite armor against ballistic impact of flat-nosed projectile. **Ceramics International, 47** (2021): 22497-22513.
42. Şanlıtürk**,** S**.,** 2020**.** Al Katmanlar Kullanılarak Üretilmiş Fiber Metal Tabakalı Kompozitlerin Delinmesinin Araştırılması. Batman Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Batman, 13-59s.

43. Camcı, E., Fındık**,** F., Barlay E, Özgecan**.,**2020. Metal esaslı sandviç kompozitlerin balistik performansının incelenmesi. **Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, 8** (2020): 1454-1469.

44. Gülcan, O., Tekkanat**,** K., Çetinkaya, B**.,**2019. Fiber metal laminatlar ve uçak sanayiinde kullanımı üzerine bir inceleme. **Mühendis ve Makine Dergisi, 60** (697): 262-288.

45. Peng, L., Tan**,** M.T., Zhang, X**.,** Han, G., Xiong, W., Teneiji, M. A., Guan, Z.W.,2022. Makalenin Investigations of the ballistic response of hybrid composite laminated structures. **Composite Structures, 282**: 115019.

46. Pach, J., Pyka**,** D., Jamroziak, K**.,** Mayer, P.,2017. The experimental and numerical analysis of the ballistic resistance of polymer composites. **Composites Part B: Engineering, 113**: 24-30.

47. Rathod, S., Tiwari**,** G., Chougale, D**.,**2020. Ballistic performance of ceramic–metal composite structures. **Materials Today: Proceedings, 41** (2021): 1125-1129.

48. Mehara, M., Goswami**,** C., Kumar, S. R**.,** Singh, G., Wagdre, M. K.,2021. Performance evaluation of advanced armor materials. **Materials Today: Proceedings, 47** (2021): 6039-6042.

49. Aydin, M., Soydemir**,** M.,2021. Ballistic protection performance of a free ceramic particle armor system: An experimental investigation. **Ceramics International, 47** (2021): 11628-11636.

50. Arslan, K., Gunes**,** R.,2018. Experimental damage evaluation of honeycomb sandwich structures with Al/B4C FGM face plates under high velocity impact loads. **Composite Structures, 202** (2018): 304-312.

51. Sözen, E., Gündüz**,** G., İmren, E**.,**2016. Balistik panel ve zırh üretiminde kullanılan lif ve kompozit malzemeler. **Bartın Orman Fakültesi Dergisi, 18** (2): 194-204.

52. Ardıçoğlu**,** H**.,** 2019**.** Balistik Etkisine Karşı AA5083 / Al2o3 Fonksiyonel Derecelendirilmiş Kompozit Malzemeden Ve AA5083 Köpükten Oluşan Zırh Malzemesinin Üretilmesi Ve Geliştirilmesi. Gazi Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Ankara, 1-65s.

53. Mugica**,** J. I., Aretxabaleta, L., Ulacia, I., Mateos M., Aurrekoetxea, J., 2012. Impact characterızatıon and sımulatıon of a fml based on a self reınforced polypropylene**,** 1-8. *15th European Conference On Composıte Materıals*, June 2012**,** Venice, Italy, 106145 pp.

54. Alderliesten, R.C., Benedictus**,** R.,2008. F57iber/Metal composite technology for future primary aircraft structures. **Journal of Aircraft, 45** (4): 1182-1189.

55. Türkdoğan**,** C**.,** 2019**.** Development Of Adhesıvely Bonded Glass Fiber Reinforced Polypropylene/Aluminium Based Fiber Metal Laminates (Fmls). Izmir Institute of Technology, Yüksek Lisans Tezi, İzmir, 4-49 s.

56. Alçı**,** M**.,** 2016**.** Katmanlı Kompozit Plakalar İle Desteklenmiş Nomex Bal Peteği Sandviç Yapıların Düşük Hızlı Darbe Davranışlarının İncelenmesi. Erciyes Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Kayseri, 5-8 s.

57. Irhayım**,** A. J. A., 2021**.** Investıgatıon Of Mechanıcal And Metallurgıcal Propertıes Of Shape Memory Nıtınol Based Wıres. Karabük Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Karabük, 2s.

58. Acar, E., Oktay**,** T.,2018. . Havacılık ve uzay uygulamalarında şekil hafızalı alaşımlar. **Ömer Halis Demir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 7** (1): 335-349.

59. Acar, E.,2018. Şekil hafızalı alaşımların biyomedikal uygulamaları. **Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, 14**: 134-144.

60. Saygılı**,** T. Y**.,** 2018**.** Nitinol Alaşımının Farklı Yaşlandırma Sıcaklıklarında Faz Dönüşüm Kinetiklerinin İncelenmesi. Adıyaman Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Adıyaman, 66-80 s.

61. Çelik Bedeloğlu, A.,2011. Şekil hafızalı alaşımlar ve tekstil malzemelerindeki uygulamaları. **The Journal of Textiles and Engineer, 18** (83): 27-37**.**

62. Brojan, M., Bombač**,** David., Kosel, Franc**.,** Videnič, Tomaž.,2008. Shape memory alloys in medicine materiali z oblikovnim spominom v medicini. **Materials and Geoenvironment, 55** (2): 173-189.

63. Wanhill**,** R. J. H., 2017. Aerospace Materials and Material Technologies: Volume 1: Aerospace Materials. Spinger, Indian , 291-307 pp.

64. Maraş**,** S**.,** 2020**.** Fiber Metal Tabakalı Kompozit Plakaların Diferansiyel Quadrature Metodu İle Titreşim. Atatürk Üniversitesi, Doktora Tezi, Erzurum, 34-40 s.

65. Hakan**,** M**.,** 2017**.** Fonksiyonel Kademelendirilmiş Plakaların Farklı Mermi Çarpma Açılarında Balistik Limitlerinin Araştırılması. Erciyes Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Kayseri, 72-77s

66. Aydın**,** M**.,** 2014**.** Fonksiyonel Kademelendirilmiş Sandviç Plakaların Balistik Davranışı. Erciyes Üniversitesi, Doktora Tezi, Kayseri, 3-5 s.

EKLER

EK 1.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı: Berkan Sami KALIN

Uyruğu: Türkiye (T.C)

Doğum Tarihi ve Yeri:

Medeni Durum:

e-mail:

Yazışma Adresi:

EĞİTİM

Derece	Kurum	Mezuniyet Tarihi
Yüksek Lisans	Erciyes Üniversitesi, Makine Mühendisliği	Devam
Lisans	Erciyes Üniversitesi, Makine Mühendisliği	2019
Lise	Çukurova Toroslar Anadolu Lisesi, Adana	2013

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görev
2019-Halen	Ceha Büro Mobilyaları A.Ş.	5 Yıl
2014-2014	Bimeks Teknoloji Mağazası	7 Ay

YABANCI DİL

İngilizce

YAYINLAR

1. Kalın B.S., Çalışkan U., Apalak Z:, (2022). Investigation of Ballistic Performance of Super Elastic Metal-Fiber Layer Sandwich Structures. *VII. Internetional Scientific And Vocational Studies Congress Science And Engineering,* Kayseri, Türkiye, Aralık 2022 pp 171-176