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

POLİMER - METAL MATRİSLİ KOMPOZİTLERDEN OLUŞTURULMUŞ SANDVİÇ YAPILARIN BALİSTİK DAVRANIŞLARI

Hazırlayan
Ertan KÖSEDAĞ

Danışman
Doç. Dr. Recep EKİCİ

Doktora Tezi

Aralık 2020
KAYSERİ

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

POLİMER - METAL MATRİSLİ KOMPOZİTLERDEN OLUŞTURULMUŞ SANDVİÇ YAPILARIN BALİSTİK DAVRANIŞLARI

(Doktora Tezi)

Hazırlayan
Ertan KÖSEDAĞ

Danışman
Doç. Dr. Recep EKİCİ

Bu çalışma, Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından FDK- 2018- 8658 kodlu proje ile desteklenmiştir.

Aralık 2020
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.



Ertan KÖSEDAĞ

"Polimer-Metal Matrisli Kompozitlerden Oluşturulmuş Sandviç Yapıların Balistik Davranışları" adlı Doktora tezi, Erciyes Üniversitesi Lisansüstü Tez Önerisi ve Tez Yazma Yönergesi' ne uygun olarak hazırlanmıştır.

Hazırlayan
Ertan KÖSEDAĞ

Danışman
Doç. Dr. Recep EKİCİ

Makine Mühendisliği ABD Başkanı
Prof. Dr. Veysel ÖZCEYHAN

Doç. Dr. Recep EKİCİ danışmanlığında **Ertan KÖSEDAĞ** tarafından hazırlanan **"Polimer-Metal Matrisli Kompozitlerden Oluşturulmuş Sandviç Yapıların Balistik Davranışları"** adlı bu çalışma jürimiz tarafından Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Makine Mühendisliği** Anabilim Dalında **Doktora** tezi olarak kabul edilmiştir.

18 / 12 / 2020

JÜRİ:

Danışman : Doç. Dr. Recep EKİCİ .....

Üye : Prof. Dr. Zeynep Gül APALAK .....

Üye : Doç. Dr. Fehmi NAİR .....

Üye : Prof. Dr. Yusuf CUNEDİOĞLU .....

Üye : Doç. Dr. Kemal YILDIZLI .....

ONAY:

Bu tezin kabulü Enstitü Yönetim Kurulunun ……...… tarih ve ……..…….sayılı kararı ile onaylanmıştır.

……. /……../ ……

Prof. Dr. Mehmet AKKURT

Enstitü Müdürü

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam süresince bilgi birikiminden yararlandığım ve çalışmam boyunca her türlü maddi, manevi destek ve yardımını esirgemeyen alçak gönüllülüğün ne olduğunu kendisinden gördüğüm danışman hocam sayın Doç. Dr. Recep EKİCİ başta olmak üzere değerli hocalarım Doç. Dr. Fehmi NAİR ve Prof. Dr. Zeynep Gül APALAK' a teşekkür ederim.

Çalışmam boyunca eksik olduğum konularımı tamamlamak için yardımlarını esirgemeyen hocalarım Dr. Öğr. Üyesi Umut ÇALIŞKAN' a, Dr. Öğr. Üyesi Murat AYDIN' a ve deneysel çalışmam boyunca laboratuvarda yaşadığım her türlü aksaklıkta yanımda gördüğüm Arş. Gör Mevlüt HAKAN' a teşekkürü bir borç bilirim.

Tez çalışmama maddi destek veren Erciyes Üniversitesi, Bilimsel Araştırma Projeleri Başkanlığı'na (FDK- 2018- 8658) teşekkür ederim.

Çalışmalarım süresince destekleri ile yanımda olan tüm dostlarıma, hayatımın her döneminde maddi manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen aileme, eşim Kübra KÖSEDAĞ' a kızım Zeynep Duru KÖSEDAĞ' a ve doktora eğitimimin sonuna doğru ailemize katılan oğlum Mehmet Efdal KÖSEDAĞ' a teşekkürlerimi sunarım.

Ertan KÖSEDAĞ

Aralık 2020, KAYSERİ

POLİMER - METAL MATRİSLİ KOMPOZİTLERDEN OLUŞTURULMUŞ SANDVİÇ YAPILARIN BALİSTİK DAVRANIŞLARI

Ertan KÖSEDAĞ

Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
Doktora Tezi, Aralık 2020
Danışman: Doç. Dr. Recep EKİCİ

ÖZET

Bu çalışmada metal matrisli kompozit ve polimer matrisli kompozit tabakalardan üretilmiş yeni bir çeşit sandviç yapının balistik davranışları incelenmiştir. Bu amaçla öncelikle metal matrisli kompozit takviye elamanı türü ve oranını belirlemek için çeşitli oranlarda B_4C ve SiC takviyeli Al6061 matrisli kompozit malzemeler üretilmiş ve düşük hızda darbe testlerine tabi tutularak sonuçları incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar değerlendirilip sandviç yapıda kullanılacak metal matrisli kompozit malzemenin hacimce % 20 SiC takviyeli Al6061 matrisli kompozit malzeme olmasına karar verilmiştir. Polimer matrisli kompozit malzeme olarak, aramid fiber takviyeli polimer matrisli kompozit malzemeler prepreg yapıdan üretilmişlerdir. Bu iki tür kompozit malzeme çeşitli konfigürasyonlarda bir araya getirilerek beş farklı sandviç yapı elde edilmiştir. Bu sandviç yapılara üç farklı hız düzeyinde atışlar gerçekleştirilmiş olup tabaka diziliminin balistik davranış üzerindeki etkisi ortaya konmuştur. Bu amaçla delinen numunelerde mermi giriş hızı ve çıkış hızından yola çıkılarak sandviç yapıların absorbe ettikleri enerji ortaya konulmuştur. Delinmeyen sandviç yapılar da ise mermi batma miktarı ölçülüp kıyaslanmıştır. Bu sonuçlara göre en dayanıklı sandviç yapı konfigürasyonu tespit edilmiştir.

Tez çalışması kapsamında sandviç yapıyı oluşturan her bir tabaka olan metal matrisli ve polimer matrisli kompozitlerin düşük hızda darbe testleri ayrı ayrı gerçekleştirilmiş olup ayrıca bu kompozit malzemelerin yoğunlukları deneysel olarak ölçülüp teorik değerleri ile karşılaştırılmıştır. Bunun yanında, metal matrisli kompozit malzemenin sertlik değerleri deneysel olarak tespit edilmiştir. Metal matrisli kompozitleri oluşturan tozların

ve kompozit malzemelerin taramalı elektron mikroskobu görüntüleri alınıp incelenmiştir.

Düşük hızda darbe testi yapılan metal matrisli kompozit malzemeler ve sadece metal matrisli kompozitten meydana gelen beşinci tip kompozit malzeme sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak modellenmiş ve darbe testleri gerçekleştirilmiştir. Düşük hızlı darbe testlerinden elde edilen temas kuvveti - zaman eğrileri ile balistik testlerde elde edilen mermi batma miktarı ve çıkış hızı sonuçlarının deneysel sonuçlar ile uyum içerisinde oldukları tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Balistik Test, Düşük Hızda Darbe Testi, Metal Matrisli Kompozit, Polimer Matrisli Kompozit, Sandviç Yapı.

BALLISTIC BEHAVIOR OF SANDWICH STRUCTURES CONSTRUCTED FROM POLYMER-METAL MATRIX COMPOSITES

Ertan KÖSEDAĞ

Erciyes University, Graduate School of Natural and Applied Sciences
PhD Thesis, December 2020
Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Recep EKİCİ

ABSTRACT

In this study, the ballistic behaviors of a new type sandwich structure made of metal matrix composite and polymer matrix composite layers were investigated. For this purpose, first of all, B_4C and SiC reinforced Al6061 matrix composite materials were produced in order to determine the type and volume fraction of metal matrix composite reinforcement. Then, it was subjected to the low velocity impact tests and its results were examined. The results obtained were evaluated and, it was decided that the metal matrix composite material to be used in the sandwich structure would be a composite material with 20% SiC reinforced Al6061 matrix. As a polymer matrix composite material, aramid fiber reinforced polymer matrix composite materials are produced from prepreg. Five different sandwich structures have been obtained by combining these two types of composite materials in various configurations. These sandwich structures were fired at three different velocity levels and the effect of layer sequencing on ballistic behavior was revealed. For this purpose, the energy absorbed by the sandwich structures has been determined based on the bullet entry velocity and exit velocity in the drilled samples. In non-puncture sandwich structures, the amount of bullet penetration was measured and compared. According to these results, the most durable sandwich structure configuration was determined.

Within the scope of the thesis work, low velocity impact tests of metal matrix and polymer matrix composites, which are each layer forming the sandwich structure, were carried out separately. In addition, the densities of these composite materials were measured experimentally and compared with their theoretical values. Besides, the hardness values of the metal matrix composite material were determined

experimentally. Scanning electron microscope images of the powders and composite materials that make up the composites were taken and examined.

Metal matrix composite materials undergoing the low velocity impact test and the fifth type composite material consisting only of metal matrix composite were modeled using the finite element method and impact tests were performed. It was determined that the contact force-time curves obtained from the low velocity impact tests and the bullet penetration and exit velocity results obtained in ballistic tests were in a good agreement with the experimental results.

Keywords: Ballistic Test, Low Velocity Impact Test, Metal Matrix Composite, Polymer Matrix Composite, Sandwich Structure.

İÇİNDEKİLER

POLİMER - METAL MATRİSLİ KOMPOZİTLERDEN OLUŞTURULMUŞ SANDVİÇ YAPILARIN BALİSTİK DAVRANIŞLARI

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK ii

YÖNERGEYE UYGUNLUK ii

KABUL VE ONAY iv

TEŞEKKÜR v

ÖZET vi

ABSTRACT viii

İÇİNDEKİLER x

KISALTMALAR xiii

TABLOLAR LİSTESİ xiv

ŞEKİLLER LİSTESİ xv

GİRİŞ 1

1.BÖLÜM

GENEL BİLGİLER VE LİTERATÜR ÇALIŞMASI

1.1.Tezin Konusu, İçeriği ve Önemi 4

1.2. Fiber Metal Laminatlar 6

1.2.1. Fiber Metal Laminatların Üretimi ve Literatür Bilgisi 9

1.3. Metal Matrisli Kompozitler 17

1.3.1. Metal Matrisli Kompozitlerin Üretim Yöntemleri ve Literatür Bilgisi 19

1.3.1.1. Toz Metalurjisi Metodu 20

1.3.1.2. Difüzyon ile Bağlama Metodu 23

1.3.1.3. Mekanik Alaşımlama Metodu 23

1.3.1.4. Metal Matrisli Kompozit Darbe Davranışı İle İlgili Literatür İncelemesi 24

1.4. Polimer Matrisli Kompozitler 30

1.4.1. Termoset ve Termoplastik Polimerler. 31

1.4.2. Polimer Matrisli Kompozitlerde Kullanılan Takviye Malzemeleri. 32

1.4.3. Polimer Matrisli Kompozitlerin Üretim Yöntemleri 33

1.4.4. Prepreg ile Üretim.....33

1.5. Kompozit Malzemelerin Darbe Davranışını Tespiti İçin Uygulanan Darbe Testleri ve Hasar Çeşitleri 37

1.5.1. Düşük hızlı darbe test yöntemleri 39

1.5.2. Yüksek hızlı Darbe test Yöntemleri.....41

1.5.3. Hasar çeşitleri 42

2.BÖLÜM

DENEYSEL VE SAYISAL YÖNTEM

2.1. Deneysel çalışma.....45

2.2. Sayısal çalışma.....58

3.BÖLÜM

BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Mikroyapı, Sertlik ve Yoğunluk Analizleri 61

3.2 Metal Matrisli Kompozitler ve Polimer Matrisli Kompozitlerin Darbe Testleri 65

3.2.1. Metal Matrisli Kompozitlerin Düşük Hızlı Darbe Testleri.....65

3.2.2. Metal Matrisli Kompozitlerin Balistik Testleri 87

3.2.3 Polimer Matrisli Kompozitlerin Düşük Hızlı Darbe Testleri 91

3.3. Sandviç Yapıların Balistik Testleri 94

3.3.1. Birinci Tip Numunelerin Balistik Davranışları 97
3.3.2. İkinci Tip Numunelerin Balistik Davranışları 103
3.3.3. Üçüncü Tip Numunelerin Balistik Davranışları 109
3.3.4. Dördüncü Tip Numunelerin Balistik Davranışları.....114
3.3.5. Beşinci Tip Numunelerin Balistik Davranışları.....120
3.3.6. Beşinci Tip Numune Balistik Davranışlarının Nümerik Analizleri.....125
3.3.7. Farklı Tipteki Numunelerin Balistik Davranışlarının Karşılaştırılması 129

4.BÖLÜM

SONUÇ VE ÖNERİLER

4.1. Sonuç ve Öneriler.....134

KAYNAKÇA 138

ÖZGEÇMİŞ.....145

KISALTMALAR

FML	: Fiber Metal Laminant
FMMKL	: Fiber Metal Matrisli Kompozit Laminant
GLARE	: Cam Fiber Takviyeli Laminant
ARALL	: Aramit Fiber Takviyeli Laminant
CARALL	: Karbon Fiber Takviyeli Laminant
MMK	: Metal Matrisli Kompozit
PMK	: Polimer Matrisli Kompozit
PTMMK	: Partikül Takviyeli Metal Matrisli Kompozit
SEM	: Sonlu Elemanlar Metodu
FSP	: Mermiyi Simüle Eden Parçacık (Fragment Simulating Projectile)
FPS	: Frame Per Second (saniyede alınan görüntü sayısı)
ρ k	: Kompozit Yoğunluğu
ρ s	: Su Yoğunluğu
wh	: Havadaki Ağırlık
ws	: Sudaki Ağırlık

TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 1.1. Fiber metal laminatların avantajları. 8
Tablo 1.2. Fiber metal laminatların üretiminde tarihsel gelişme..... 10
Tablo 1.3. FML'lerde deneysel çalışma gerçekleştiren bazı yayınlar. 12
Tablo 1.4. FML'lerde nümerik araştırma gerçekleştirilen bazı çalışmalar..... 15
Tablo 1.5. Silisyum Karbür kullanım parametreleri 27
Tablo 2.1. Al6061 alaşımının kimyasal bileşimi..... 46
Tablo 2.2. Metal matrisli kompozit malzeme bileşenlerinin bazı mekanik özellikleri. 47
Tablo 2.3. Kompozit numuneler için kullanılan toz miktarları..... 51
Tablo 2.4. AL6061, SiC, B_4C ve AIS4340 çeliğinin bazı mekanik özellikleri..... 58
Tablo 3.1. Metal matrisli kompozitlerin sertlik değerleri..... 63
Tablo 3.2. Numunelerin deneysel yoğunluk değerleri. 64
Tablo 3.3. Numunelerin deneysel ve teorik yoğunluk değerleri ve porozite oranları. 64
Tablo 3.4. Metal matrisli kompozitlerin balistik test sonuçları..... 89
Tablo 3.5. Sandviç yapı ağırlıkları. 133

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. Tipik bir sandviç yapı.....6
Şekil 1.2. Tabakalı yapıların sınıflandırılması. 7
Şekil 1.3. Vakum torbası sisteminin şematik gösterimi [2]. 9
Şekil 1.4. a) Partikül b) kısa fiber veya whisker c) sürekli fiber takviyeli kompozitler. 18
Şekil 1.5. MMK üretim metotları [45]. 20
Şekil 1.6. Toz metalurjisi üretim yöntemi uygulama adımları. 21
Şekil 1.7. Tek eksenli ve tek hareketli kalıp ve koç sisteminin kesit görüntüsü [48]. 22
Şekil 1.8. Difüzyonla bağlama yöntemi uygulama adımları [47]. 23
Şekil 1.9. Mekanik alaşımlama cihazı ve soğuk kaynak, kırılma mekanizmaları [46]. 24
Şekil 1.10. Tabakalı kompozit Numunesi [69]. 28
Şekil 1.11. Polimer çeşitleri. 30
Şekil 1.12. Zincir yapılarının şekline göre polimerler.....31
Şekil 1.13. Boşluk miktarının kesme kuvveti üzerindeki etkisi [82]. 35
Şekil 1.14. Epoksi karışımının fiberleri sarması[83].....35
Şekil 1.15. Prepreg üretim şeması [83]. 36
Şekil 1.16. Prepreg ile üretim yapılırken referans alınan akışkan yay düzeneği [83]. 36
Şekil 1.17. Sıcak pres ile prepreg üretimi 37
Şekil 1.18. Yaygın olarak kullanılan darbe test metotları: a) Sarkaç testleri (Carpy ve Izod), b) Ağırlık düşürme testleri, c) Gazlı ve havalı silah (balistik) testleri [84]. 38
Şekil 1.19. Pendulum darbe test metodu [85]. 40
Şekil 1.20. Ağırlık düşürme kulesi [21]. 41
Şekil 1.21. Yüksek Hızlı Darbe Test Düzeneği [21]. 41
Şekil 1.22. Split hopkinson basınçlı çubuk test cihazı şeması [90].....42
Şekil 1.23. PMK'larda hasar ilerlemesi [91]. 43
Şekil 1.24. Katmanlı bir PMK için darbe yönüne göre oluşan hasarlar [92]. 43

Şekil 1.25. a, b)Fiberin dizilimine ve c, d) kompozit yapının kalınlığına göre hasar çeşitleri [88]. 44
Şekil 2.1. MMK üretiminde kullanılan sıcak pres cihazı. 45
Şekil 2.2. Metal matrisli kompozit üretim şeması. 46
Şekil 2.3. MMK için toz karışım cihazı (a) ve elde edilen kompozit malzemenin geometrisi (b). 47
Şekil 2.4. Düşük hızlı darbe test cihazı. 48
Şekil 2.5. Balistik test cihazı ve şahit yapı. 49
Şekil 2.6. Balistik testlerde kullanılan mermi geometrisi ve mermi sabot sistemi. 50
Şekil 2.7. Balistik testlerde görüntü almak için kullanılan kamera sistemi. 50
Şekil 2.8. Numune üretimi için kullanılan kalıplar. 52
Şekil 2.9. Metal matrisli kompozit yüzey temizlemesi. 52
Şekil 2.10. Düşük hız ve balistik testler için üretilen MMK'lar. 53
Şekil 2.11. Prepregten polimer matrisli kompozit üretim aşamaları. 54
Şekil 2.12. Tel erozyon ile kesilmiş numune örneği. 55
Şekil 2.13. Split Hopkinson basınçlı çubuk test cihazı. 56
Şekil 2.14. Sandviç yapıyı oluşturan numune tipleri. 57
Şekil 2.15. Split hopkinson cihazından elde edilen gerilim strain eğrisi. 60
Şekil 2.16. Beşinci tip numune ve mermi modeli. 60
Şekil 3.1. MMK'ları üretmek için kullanılan tozların taramalı elektron mikroskobu görüntüleri. 61
Şekil 3.2. Hacimce %20 oranında SiC takviyeli Al6061 matrisli kompozitlerin farklı büyütmelerdeki taramalı elektron mikroskobu görüntüleri. 62
Şekil 3.3. Vickers sertlik ölçümü. 63
Şekil 3.4. MMK ve PMK yoğunluk ölçümleri. 64
Şekil 3.5. Al6061 numunesine ait temas kuvveti - zaman eğrisi. 66
Şekil 3.6. Al6061 numunesine ait temas kuvveti - yer değiştirme eğrisi. 66
Şekil 3.7. Al6061 numunesine ait enerji - zaman eğrisi. 66
Şekil 3.8. %5 B_4C/Al6061 numunesine ait temas kuvveti - zaman eğrisi. 67
Şekil 3.9. %5 B_4C/Al6061 numunesine ait temas kuvveti - yer değiştirme eğrisi. 67
Şekil 3.10. %5 B_4C/Al6061 numunesine ait enerji - zaman eğrisi. 68
Şekil 3.11. %10 B_4C/Al6061 numunesine ait temas kuvveti- zaman eğrisi. 69
Şekil 3.12. %10 B_4C/Al6061 numunesine ait temas kuvveti – yer değiştirme eğrisi. 69

Şekil 3.13. %10 B_4C/Al6061 numunesine ait enerji - zaman eğrisi. 69
Şekil 3.14. %15 B_4C/Al6061 numunesine ait temas kuvveti - zaman eğrisi. 70
Şekil 3.15. %15 B_4C/Al6061 numunesine ait temas kuvveti - yer değiştirme eğrisi.. 70
Şekil 3.16. %15 B_4C/Al6061 numunesine ait temas enerji - zaman eğrisi. 70
Şekil 3.17. B_4C/Al6061 numunelerine ait plastik deformasyon görüntüleri..... 71
Şekil 3.18. %5 SiC/Al6061 numunesine ait temas kuvveti - zaman eğrisi. 72
Şekil 3.19. %5 SiC/Al6061 numunesine ait temas kuvveti – yer değiştirme eğrisi.... 72
Şekil 3.20. %5 SiC/Al6061 numunesine ait enerji - zaman eğrisi. 73
Şekil 3.21. %10 SiC/Al6061 numunesine ait temas kuvveti - zaman eğrisi. 74
Şekil 3.22. %10 SiC/Al6061 numunesine ait temas kuvveti – yer değiştirme eğrisi.. 74
Şekil 3.23. %10 SiC/Al6061 numunesine ait enerji - zaman eğrisi. 74
Şekil 3.24. %15 SiC/Al6061 numunesine ait temas kuvveti - zaman eğrisi. 75
Şekil 3.25. %15 SiC/Al6061 numunesine ait temas kuvveti – yer değiştirme eğrisi.. 75
Şekil 3.26. %15 SiC/Al6061 numunesine ait enerji - zaman eğrisi. 75
Şekil 3.27. SiC/Al6061 numunelerine ait plastik deformasyon görüntüleri. 76
Şekil 3.28. Farklı oranda takviye içeren numunelere ait takviye elemanı dağılımı görüntüleri. 77
Şekil 3.29. %5 B_4C/Al6061 numunesine ait deneysel ve nümerik temas kuvveti - zaman eğrileri. 78
Şekil 3.30. %10 B_4C/Al6061 numunesine ait deneysel ve nümerik temas kuvveti - zaman eğrileri. 78
Şekil 3.31. %15 B_4C/Al6061 numunesine ait deneysel ve nümerik temas kuvveti - zaman eğrileri. 79
Şekil 3.32. %5 SiC/Al6061 numunesine ait deneysel ve nümerik temas kuvveti - zaman eğrileri. 80
Şekil 3.33. %10 SiC/Al6061 numunesine ait deneysel ve nümerik temas kuvveti - zaman eğrileri. 80
Şekil 3.34. %15 SiC/Al6061 numunesine ait deneysel ve nümerik temas kuvveti - zaman eğrileri. 81
Şekil 3.35. B_4C/Al6061 numunelerine ait plastik deformasyon karşılaştırmaları. 82
Şekil 3.36. SiC/Al6061 numunelerine ait plastik deformasyon karşılaştırmaları. 83
Şekil 3.37. %20 SiC/Al6061 numunesine ait temas kuvveti - zaman eğrisi. 84
Şekil 3.38. %20 SiC/Al6061 numunesine ait enerji - zaman eğrisi. 84

Şekil 3.39. %20 SiC/Al6061 numunesine ait temas kuvveti – yer değiştirme eğrisi..84
Şekil 3.40. %30 SiC/Al6061 numunesine ait temas kuvveti - zaman eğrisi. 85
Şekil 3.41. %30 SiC/Al6061 numunesine ait temas kuvveti – yer değiştirme eğrisi..85
Şekil 3.42. %40 SiC/Al6061 numunesine ait temas kuvveti - zaman eğrisi. 85
Şekil 3.43. %40 SiC/Al6061 numunesine ait temas kuvveti – yer değiştirme eğrisi..86
Şekil 3.44. Düşük hızlı darbe testi sonunda numunelerde meydana gelen hasar görüntüleri. 87
Şekil 3.45. Balistik test sonucu şahit yapı görüntüsü. 88
Şekil 3.46. Balistik test sonrası takviyesiz numune ve metal matrisli kompozitlerin hasar görüntüleri (ön görünüş) 89
Şekil 3.47. Balistik test sonrası takviyesiz numune ve metal matrisli kompozitlerin hasar görüntüleri (arka görünüş) 90
Şekil 3.48. Prepregten üretilmiş polimer matrisli kompozitlere ait temas kuvveti zaman eğrileri. 91
Şekil 3.49. Polimer matrisli kompozitlere ait a)15 J b) 30 J ve c) 45 J değerindeki enerji - zaman eğrileri. 93
Şekil 3.50. Düşük hızlı test sonrası PMK yapıların hasar görüntüleri. 94
Şekil 3.51. Numune tiplerinin sınıflandırılması. 95
Şekil 3.52. Sandviç yapıların tiplerine ve balistik test hızlarına göre sınıflandırılması. 96
Şekil 3.53. Boş atış ile hız uyumluluğunun tespiti. 97
Şekil 3.54. S-1-1'in kesit (a), ön (b) ve arka (c) görüntüleri. 98
Şekil 3.55. S-1-1'in arkasından atış esnasında alınmış sıralı görüntüler. 98
Şekil 3.56. S-1-2'nin kesit (a), ön (b) ve arka (c) görüntüleri. 100
Şekil 3.57. S-1-2'nin arkasından atış esnasında alınmış sıralı görüntüler ve hız ölçümü. 101
Şekil 3.58. S-1-3'ün kesit (a), ön (b) ve arka (c) görüntüleri. 102
Şekil 3.59. S-1-3'ün arkasından atış esnasında alınmış sıralı görüntüler ve hız ölçümü. 103
Şekil 3.60. S-2-1'in kesit (a), ön (b) ve arka (c) görüntüleri. 105
Şekil 3.61. S-2-1'in arkasından atış esnasında alınmış sıralı görüntüler. 105
Şekil 3.62. S-2-2'nin kesit (a), ön (b) ve arka (c) görüntüleri. 106
Şekil 3.63. S-2-2'nin arkasından atış esnasında alınmış sıralı görüntüler. 106

Şekil 3.64. S-2-3'ün kesit (a), ön (b) ve arka (c) görüntüleri. 107
Şekil 3.65. S-2-3'ün arkasından atış esnasında alınmış sıralı görüntüler. 107
Şekil 3.66. S-2-4'ün arkasından atış esnasında alınmış sıralı görüntüler. 108
Şekil 3.67. S-2-4'ün kesit (a), ön (b) ve arka (c) görüntüleri. 109
Şekil 3.68. S-3-1'in kesit (a), ön (b) ve arka (c) görüntüleri. 110
Şekil 3.69. S-3-1'in arkasından atış esnasında alınmış sıralı görüntüler. 110
Şekil 3.70. S-3-2'in kesit (a), ön (b) ve arka (c) görüntüleri. 111
Şekil 3.71. S-3-2'nin arkasından atış esnasında alınmış sıralı görüntüler. 112
Şekil 3.72. S-3-3'ün kesit (a), ön (b) ve arka (c) görüntüleri. 113
Şekil 3.73. S-3-3'ün arkasından atış esnasında alınmış sıralı görüntüler ve hız ölçümü. 114
Şekil 3.74. S-4-1'in kesit (a), ön (b) ve arka (c) görüntüleri. 116
Şekil 3.75. S-4-1'ün arkasından atış esnasında alınmış sıralı görüntüler. 116
Şekil 3.76. S-4-2'nin kesit (a), ön (b) ve arka (c) görüntüleri. 117
Şekil 3.77. S-4-2'in arkasından atış esnasında alınmış sıralı görüntüler ve hız ölçümü. 118
Şekil 3.78. S-4-3'ün kesit (a), ön (b) ve arka (c) görüntüleri. 119
Şekil 3.79. S-4-3'ün arkasından atış esnasında alınmış sıralı görüntüler ve hız ölçümü. 120
Şekil 3.80. S-5-1'ün kesit (a), ön (b) ve arka (c) görüntüleri. 121
Şekil 3.81. S-5-1'in arkasından atış esnasında alınmış sıralı görüntüler. 121
Şekil 3.82. S-5-2'nin kesit (a), ön (b) ve arka (c) görüntüleri. 123
Şekil 3.83. S-5-2'nin arkasından atış esnasında alınmış sıralı görüntüler. 123
Şekil 3.84. S-5-3'ün kesit (a), ön (b) ve arka (c) görüntüleri. 124
Şekil 3.85. S-5-3'ün arkasından atış esnasında alınmış sıralı görüntüler ve hız ölçümü. 125
Şekil 3.86. S-5-1'ün SEM analizi sonucu kesit, ön ve arka görüntüleri. 127
Şekil 3.87. S-5-2'ün SEM analizi sonucu kesit, ön ve arka görüntüleri. 127
Şekil 3.88. S-5-3'ün SEM analizi sonucu kesit, ön ve arka görüntüleri. 128
Şekil 3.89. S-5-3 atışına ait merminin SEM analizi sonucu enerji – zaman eğrisi. 128
Şekil 3.90. Birinci hız düzeyinde yapılan testler sonucu numune çeşitlerinin karşılaştırılması. 129

Şekil 3.91. İkinci hız düzeyinde yapılan testler sonucu numune çeşitlerinin karşılaştırılması. 130
Şekil 3.92. Üçüncü hız düzeyinde yapılan testler sonucu numune çeşitlerinin karşılaştırılması. 131
Şekil 3.93. Bütün numunelere ait balistik test sonuçları. 132
Şekil 3.94. Sandviç yapı ağırlıkları. 133

GİRİŞ

Tarih boyunca ülkeler arasındaki üstünlük mücadelesi, üretebildiği teknoloji, gelişmiş ekonomi ve savunma sanayisindeki yetkinliği gibi birçok parametreye bağlı olarak sahip olduğu güce göre şekillenmiştir. Yüksek teknolojiye sahip olmak, savunma sanayisindeki gelişmişlik ülkeler arasında caydırıcı güç olma açısından oldukça önemlidir. Uzay, havacılık, savunma ve otomotiv gibi sektörlerin her geçen gün giderek gelişmesi ile birlikte yeni yapısal malzemelere olan ihtiyaç giderek arttırmaktadır. Metal, seramik ve polimer gibi yalın haldeki geleneksel malzemeler ihtiyacı karşılamakta yetersiz kalabilmektedir. Bu durum uzun yıllar boyunca araştırmacıları kompozit malzeme yaklaşımı üzerine yoğunlaştırmıştır. Kompozit malzemeler, çeşitli malzemelerin bir araya getirilmesi ile istenilen özellikte yeni malzemeler elde etmek amacıyla üretilen malzemelerdir. Kullanım yerlerine göre metal, seramik ve polimer matrisli olarak üretilen kompozit malzemeler günlük hayatın birçok alanında karşımıza çıkmaktadır. Örneğin havacılıkta düşük yoğunluklu, rijit, yüksek dayanıma sahip, darbe ve aşınmaya dirençli bunun yanında korozyon direnci yüksek malzemelere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu özellikleri geleneksel monolotik bir malzemede bir arada bulmak pek mümkün değildir. Metal, seramik, polimer gibi malzemelerde yoğunluğu düşük olan malzemenin dayanımı genellikle daha düşüktür. Tehditlerden korunma amacı ile çok sayıda farklı zırh malzemesi gerek askeri gerekse de sivil alanlardaki kara, deniz ve hava araçlarında kullanılmaktadır. Zırh malzemeleri olarak kara araçlarında yaygın olarak çelik ve alüminyum tercih edilirken hava araçlarında özellikle hafiflik açısından sağladıkları avantaj nedeni ile genellikle polimer matrisli kompozitler kullanılmaktadır. Çarpma etkisine maruz kalmış metal yapılarda hasar genellikle yüzeyde başlamakta ve çıplak göz ile tespit edilebilmektedir. Buna karşın polimer matrisli kompozitlerde bu hasar deleminasyon, fiber kırılması ve matris çatlağı şeklinde meydana gelmektedir bu durum çoğu zaman yapının içerisinde gerçekleşip çıplak gözle tespiti mümkün olmamaktadır. Ayrıca düşük ve orta hızlardaki çarpma etkileri metaller tarafından

elastik ve plastik olacak şekilde absorbe edilebilirken polimer matrisli kompozitlerde absorbe edilen enerji nedeniyle gerçekleşen plastik şekil değiştirme son derece azdır. Ek olarak, polimer matrisli kompozitlerde hasar bölgesi davranışını saptamak metallere kıyasla daha zordur. Tabi tüm bunlara rağmen elde edilen kompozit sistemlerinin hafif olması bakımından polimer matrisli kompozitlerin sağladığı avantajlar ortadadır. Ağırlığın azaltılması hareket kabiliyetinin arttırılmasına fayda sağladığı gibi yakıt tasarrufu ve benzeri birçok alanda da oldukça önemlidir. Bunun yanında metal plakalara kıyasla seramik takviyeli metal matrisli kompozitler rijitlik, dayanım, hafiflik açısından oldukça avantajlı bir konumdadırlar. Söz gelimi saf alüminyum bir plakaya göre seramik partiküllerle güçlendirilmiş alüminyum matrisli bir kompozit malzeme daha mukavim ve rijit bir yapıdadır. Ayrıca, çelik ile kıyaslandığında yaklaşık olarak 2,5-3 kat daha hafiftir. Yapısal malzemelerde istenilen tüm özellikleri tek bir malzemede toplamak için tabakalı sistemler geliştirilmiştir. Sandviç yapılar, tabakalı sistemlere verilebilecek örnekler arasındadır. Sandviç yapılar çekirdek malzemesi, yapıştırıcı ara tabaka ve yüzey malzemelerinin bir araya getirilmesi ile oluşturulabildiği gibi tabakalar şeklinde çok katmanlı olarak ta tasarlanabilmektedir (Şekil 1.1). Üretilecek sandviç yapıda her bir katman farklı bir etkiye sahip olacak şekilde seçilmektedir. Bir çeşit sandviç yapı olan fiber metal laminatlar (FML), fiber takviyeli polimer matrisli kompozit ve metal tabakalardan meydana gelmektedir.

Balistik genel olarak fişeğin ateşlenmesi ile mermi çekirdeğinin namludan çıkıp hedefe ulaşmasına kadar olan hareketini, hedef üzerindeki tahribatını ve mermi çekirdeğinin bu hareketine etki eden faktörleri inceleyen bilimdir. Balistik iç, dış ve terminal balistiği olmak üzere üç kola ayrılmaktadır. İç ve dış balistik, merminin sırası ile namlu içindeki ve namlu dışına çıktığı an ile hedefe varıncaya kadar geçen süredeki mermi davranışını ve etki eden faktörleri inceler. Terminal balistik ise mermi çekirdeğinin hedefe çarptıktan sonra duruncaya kadar yaptığı delme gücü enerjisini hedef cisme iletmesi ile ilgilenir. Merminin hedefe çarpmasından sonra kaybettiği enerji dört ana unsura bağlıdır bunlar; I) Mermi çekirdeğinin hedefe çarpma sırasında sahip olduğu enerji, II) Mermi çekirdeğinin hedefe çarpma sırasında ki yalpalama açısı değeri, III) Mermi çekirdeğinin kalibresi, yapısı ve şekli, IV) Mermi çekirdeğinin çarptığı hedefin karakteristik özellikleridir. Metal matrisli ve polimer matrisli tabakalar ile üretimini gerçekleştireceğimiz sandviç yapıların balistik davranışını inceleyeceğimiz bu çalışma,

terminal balistiği alanındadır. Partikül takviyeli metal matrisli kompozit malzemelerde kullanılan takviye malzemeleri genellikle karbürler (SiC, B_4C), oksitler (Al_2O_3, SiO_2), nitrürler (Si_2N_4, AlN), Si, C, gibi elementlerden meydana gelmektedir. Çalışmamızın giriş kısmında ilk olarak FML yapılar hakkında bilgi verilerek konuyla ilgili literatür taranmıştır. Ardından tez çalışmamıza konu olan FML yapıyı oluşturan metal matrisli kompozit ve polimer matrisli kompozitler, bunların üretim metotları ve bu konular ile ilgili literatür hakkında kısa açıklamalar yapılmıştır. Üretim yöntemlerinden özellikle tez çalışmasında kullanılan yöntemler üzerine yoğunlaşılmıştır. Sonrasında malzemelerin darbe davranışlarını belirlemek adına kullanılan darbe testleri ve hasar hakkında bilgi verilmiştir. Daha sonra, çalışmamızın deneysel üretim test ve modelleme konusu üzerinde durulmuş ve ardından elde edilen sonuçlar verilmiştir. Son olarak, elde edilen veriler yorumlanmıştır.

1. BÖLÜM

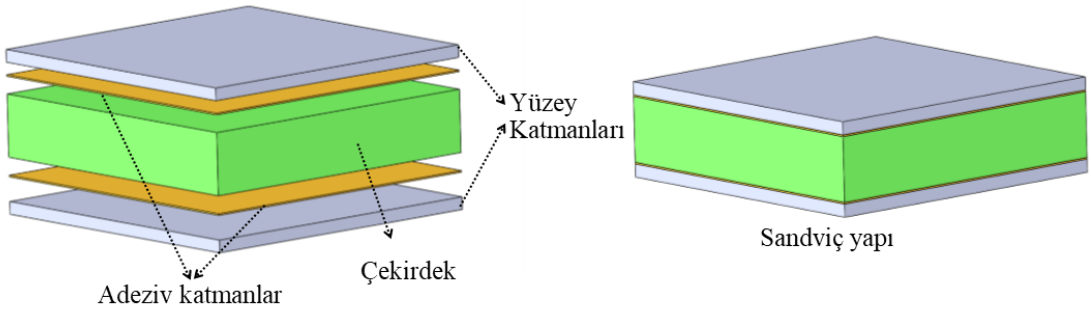
GENEL BİLGİLER VE LİTERATÜR ÇALIŞMASI

1.1. Tezin Konusu, İçeriği ve Önemi

Bir çeşit sandviç yapı olan fiber metal laminatlar, fiber takviyeli polimer matrisli kompozit ve metal tabakalardan meydana gelmektedir. Bu tür malzemelerde kullanılmakta olan metaller genellikle alüminyum, magnezyum, titanyum ve çelik iken fiber takviyeli tabaka ise cam fiber, karbon fiber ya da aramid fiber takviyeli polimer matrisli kompozitlerdir. Fiber metal laminatlar, alternatif olarak istiflenmiş metal ve fiber takviyeli kompozit katmanlardan oluşur. İki farklı bileşenin (Metal ve fiber takviyeli polimer matrisli kompozit) kendi avantajlarının kombinasyonu ile FML'ler, konvansiyonel kompozit laminaya kıyasla üstün mukavemet / ağırlık oranı, yüksek korozyon direnci gibi mükemmel özellikler sunarlar. Bir malzemenin darbe özellikleri, darbe veya şok yükü altındaki enerjileri emme ve dağıtma kapasitesini ifade eder. Metaller (ASTM E23) ve takviyeli olmayan polimerler (ASTM D256) için çeşitli standart darbe test yöntemleri mevcuttur. FML'lerin dinamik yükleme etkisini anlamak için temel olarak düşük ve yüksek hız testi yapılmalıdır. Düşük hızda darbe testi, serbest düşme sonucu bilinen bir ağırlığa ve çapa sahip yarım küre şeklinde bir kütlenin numune üzerine düşürülmesi ile gerçekleştirilir. Bu testlerin amacı, FML'lerin etki tepkisini tanımlamak, deleminasyon modlarını vurgulamak ve aynı zamanda ilk hasar ve hedef için eşik enerjilerini belirlemektir. Mevcut literatüre göre, bu test yöntemlerinin FML'lere uygulandığını bildiren birçok çalışma vardır. Bu çalışmalar içerisinden bir kısmı FML'lerin düşük hızlı etki özelliklerini açıklamakta iken diğer bir bölümü de FML'lerin yüksek hızlı etki özelliklerini ele almaktadır. Yapılan literatür taramaları neticesinde FML yapılarda metal tabaka yerine metal matrisli kompozit malzemenin kullanıldığı bir çalışmaya rastlanılmamıştır. Tez çalışmamızda tabakalı

yapılara ek olarak yeni bir yaklaşım ile daha önce çalışılan FML'lerin metal tabakası yerine metal matrisli kompozit kullanılması hedeflenmektedir. Böylece savunma sanayinde özellikle zırh teknolojisi alanında yaygın olarak kullanılan aramit fiber takviyeli polimer matrisli kompozit ve saf metal plakalara göre üstün özelliklere sahip olan seramik takviyeli metal matrisli kompozitlerin bir araya getirilmesi ile yeni bir sandviç yapı elde edilecektir. Bu durumda tabakalı yapılara Fiber metal matrisli kompozit laminantlar (FMMKL) adında yeni bir malzeme çeşidi literatüre eklenmiş olunacaktır.

İlk olarak metal matrisli kompozit malzemede kullanılacak Al6061 matris malzemesini güçlendirmek için kullanılacak takviye malzemesine karar vermek için hacimce % 0, 5, 10, 15 oranında SiC ve B_4C içeren numuneler üretilip düşük hızlı darbe testleri uygulanmıştır. Metal matrisli kompozit malzemelerin gösterdikleri darbe direnci tozların maliyeti gibi parametreler göz önünde bulundurularak takviye malzemesi olarak SiC kullanılmasına karar verilmiştir. Ardından, takviye oranına karar vermek için bu üretimlere ek olarak % 20, 30 ve 40 oranında takviye malzemesi içeren numuneler üretilip düşük hızlı testlere devam edilmiş ve bunun yanında yalın haldeki bu metal matrisli kompozit malzemelere balistik testler yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre takviye oranı olarak %20 oranında SiC kullanılması kararlaştırılmıştır. Sandviç yapılar için gerekli olan tüm metal matrisli kompozit malzemeler üretildikten sonra polimer matrisli kompozit yapının türü ve üretim yöntemine karar vermek için araştırma ve çeşitli ön deneyler yapılmış ve sonuç olarak prepreg yapıdan aramit fiber takviyeli kompozitler üretilmesine karar verilmiştir. Üretilen bu metal matrisli kompozit ve polimer matrisli kompozit numuneler eşdeğer kalınlıkta olacak şekilde çeşitli konfigürasyonlarda bir araya getirilerek FMMKL yapılar elde edilmiştir. Elde edilen sandviç yapının balistik performansının tabaka dizilim sırasından nasıl etkilendikleri deneysel olarak belirlenmiş olup en uygun takviye oranına sahip seramik takviyeli metal matrisli kompozit ve polimer matrisli kompozitten elde edilen tabakalı yapının optimum dizilim sırası belirlenmiştir. Ek olarak, farklı takviye oranlarındaki metal matrisli kompozit malzemeler ve sadece metal matrisli kompozit malzemeden oluşmuş beşinci tip numuneler sonlu elemanlar metodu ile modellenip darbe testleri gerçekleştirilmiş ve deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

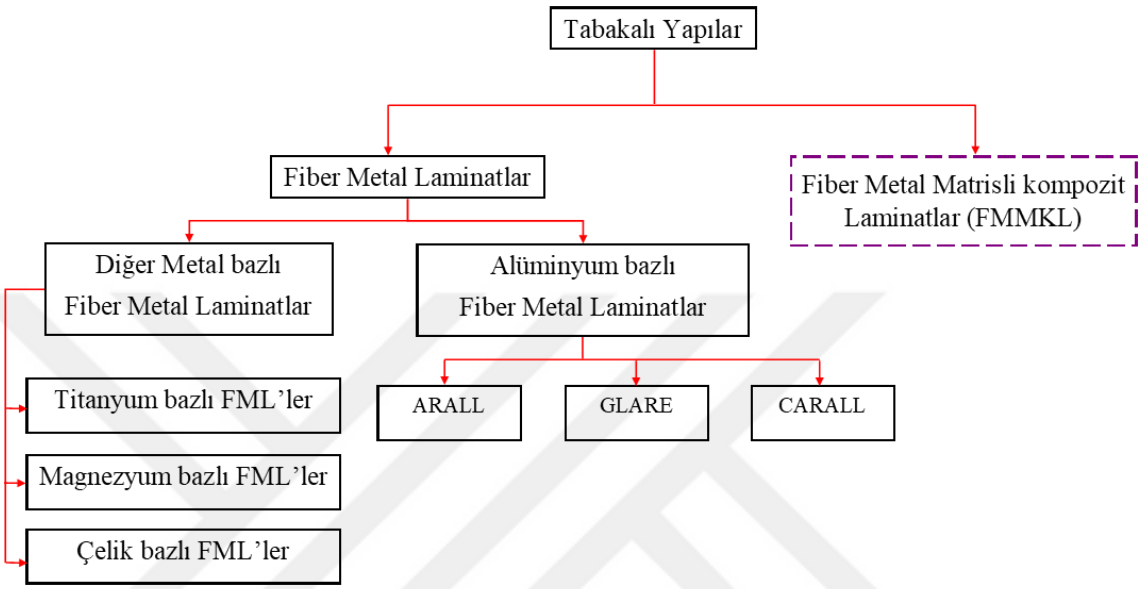


Şekil 1.1. Tipik bir sandviç yapı.

1.2. Fiber Metal Laminatlar

Fiber metal laminatlar, fiber takviyeli polimer matrisli kompozit ve metal tabakalardan meydana gelmektedir. FML'ler sahip oldukları üstün özellikler sayesinde özellikle havacılık alanında birçok uygulamada yer edinmişlerdir. Örneğin, Boeing 777, United 735 ve 757, Midwest Expres DC9'un kargo zemininde hali hazırda kullanılırken, birçok diğer havacılık firmasının özellikle darbeye maruz kalan bölümler ile ilgili yapıları için geliştirme aşamasındadır [1]. Bu tür malzemelerde kullanılmakta olan metaller genellikle alüminyum, magnezyum, titanyum ve çelik iken fiber takviyeli tabaka ise cam fiber, karbon fiber ya da aramit fiber takviyeli polimer matrisli kompozitlerdir. Fiber metal laminatlar, alternatif olarak istiflenmiş metal ve fiber takviyeli kompozit katmanlardan oluşur, iki farklı bileşenin (Metal ve fiber takviyeli polimer matrisli kompozit) kendi avantajlarının kombinasyonu ile FML'ler, konvansiyonel kompozit laminaya kıyasla üstün mukavemet / ağırlık oranı, yüksek korozyon direnci gibi mükemmel özellikler sunarlar [2]. 1980'lerde Delft Teknoloji Üniversitesi'nde İlk FML'lerin geliştirilmesi, ARALL olarak adlandırılan aramit takviyeli kompozit ve alüminyum plaka ile gerçekleştirilmiştir. Daha sonra, FML'lerin mekanik özelliklerini geliştirmek için, karbon fiber takviyeli (CARALL), cam fiber takviyeli (GLARE) alüminyum laminatlar geliştirilmiştir [3]. Bu laminatlar, alternatif tek yönlü kompozit tabakalar ile birbirine yapışmış ince yüksek mukavemetli alüminyum alaşımlı levhalardan oluşur. Kompozit tabakalar, bir epoksi reçinesindeki aramit, karbon veya cam elyaflardır [4]. Metal ve kompozit malzemenin birleşimi nedeniyle FML'ler sadece fiber takviyeli lamina veya monolitik alüminyum alaşımlarından oluşan geleneksel laminaya göre üstün mekanik özellikler sergiler. Fiber metal laminatların literatürden araştırılan bazı avantajları Tablo 1.1'de özetlenmiştir. Kompozit katmandaki

matrisi sertleştirmek için uzun işlem döngüsü, epoksi bazlı fiber metal laminatlarla ilişkili temel dezavantajdır. Bu uzun kürlenme süresi, tüm üretimin çevrim süresini arttırır ve verimliliği azaltır. Sonuç olarak, işgücü maliyetlerini ve FML'lerin genel maliyetini arttırır [5-7].



Şekil 1.2. Tabakalı yapıların sınıflandırılması.

FML'ler avantajları sebebiyle, havacılık ve otomobil uygulamalarında büyük kullanım alanı bulmaktadırlar. Günümüzde çoğu şirket alüminyumun avantajlarından dolayı FML'lerin alüminyum bileşenleri üzerinde yoğunlaşmıştır. ARALL ve GLARE laminatlar günümüzde uçak yapımında yapısal malzemeler olarak kullanılmaktadırlar. Fiber metal laminatlar Airbus A380'de etkin bir şekilde kullanılmaktadır [5,6]. FML özelliklerinin belirtilen avantajlarına rağmen, hala daha fazla çalışılması gerektiği bilinen bir gerçektir. FML'lerin mekanik özellikleriyle ilgili birçok makale yayınlanmış olsa da, FML'nin performansı ile ilgili araştırmalar henüz başlangıç aşamasındadır. Tabakalı yapıların bir alt kolu olan fiber metal laminantlar Şekil 1.2'de de gösterildiği gibi bir katmanının metal olması esasına dayanmaktadır. Bu metaller en sık kullanılan alüminyum ve titanyum, magnezyum, çelik ve bunların alaşımları gibi tabakalardan meydana gelebilmektedir. Çalışmamız bu yönde fiber metal laminatlara bir yenilik ekleyecek olup metal olan tabaka yerine metal matrisli kompozit kullanılmıştır. Bu durumda Şekil 1.2'deki tabakalı yapılar kısmının sağ tarafına yeni olan fiber metal matrisli kompozit laminatlar (FMMKL) eklenmiş olacaktır.

Tablo 1.1. Fiber metal laminatların avantajları.

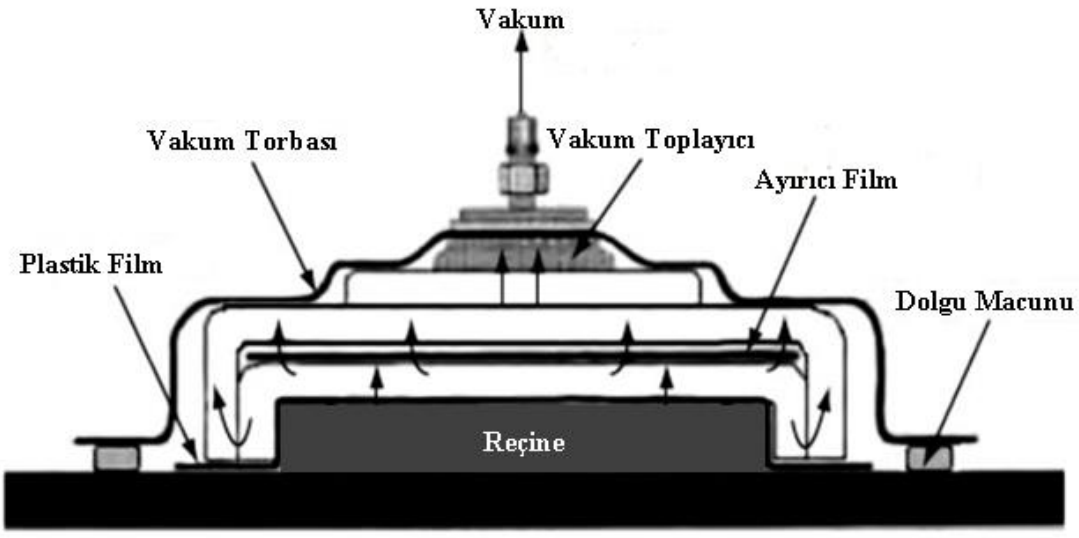
Parametreler	Detaylar	Kaynak
Yüksek mukavemet	FML'ler, ince metal alaşımlı levhalara ve fiber takviyeli polimerik malzemelerin katlarına dayalı hibrit yapılardır. Hem yüksek mukavemete hem de sertliğe sahip metal ve fiber takviyeli kompozitler, FML'lerin yüksek mukavemet ve sertliğe sahip olmasına neden olur.	[5,6]
Düşük yoğunluklu	İnce metal tabakalarının ve kompozit yığınların varlığından dolayı, düşük yoğunluğa sahiptir. Bu nedenle, FML'ler diğerlerine kıyasla ağırlık tasarrufu sağlayan bir yapısal malzemedir.	[8]
Mükemmel korozyon direnci	FML'ler polimer bazlı olması nedeniyle mükemmel nem direnci ve yüksek korozyon direnci sağlar.	[8-11]
Mükemmel nem direnci	Dış yüzeydeki metal tabakaların varlığından dolayı, FML'nin kompozitlerinde nem emilimi, nispeten sert koşullar altında bile polimer kompozitlerle karşılaştırıldığında daha yavaştır. Ek olarak, kompozit katmanları, FML'lerin içindeki çeşitli alüminyum katmanlar arasında nem bariyeri görevi görebilir.	[2,11]
Yüksek yorulma direnci	Çatlak sonrasında sağlam çatlak lifleri nedeniyle çatlak açıklığını sınırlayan yüksek yorulma direnci sağlar. FML'ler geleneksel metal ve kompozitlere göre mükemmel yorulma özelliklerine sahiptir.	[6,11]
Yüksek enerji emme kapasitesi	Araştırma verilerine göre FML'ler, metal olmayan katlardaki lokalize elyaf kırılması ve kayma yetersizliği ile kayda değer enerjiyi emilimi yapmaktadır.	[7,11]
Yüksek darbe dayanımı	Darbe deformasyonu aslında FML'lerin, özellikle de kompozitlerle karşılaştırıldığında önemli bir avantajdır.	[9,12]

1.2.1. Fiber Metal Laminatların Üretimi ve Literatür Bilgisi

FML'leri üretmek için kullanılan en yaygın işlem, polimerik kompozit malzemeler için olduğu gibi, otoklav işlemenin kullanılmasıdır. Üretimde aşağıdaki temel adımlar genelde takip edilmektedir [8,12-14].

1) Metal katmanın yüzeyi kromik asit veya fosforik asit gibi bir asidik çözelti ile ön işlemden geçirilir, bu işlemin sebebi yapışkan kısım ile metal yüzey arasındaki bağı geliştirmektir.
2) El yatırması şeklinde alüminyum plaka ve cam, karbon, aramid fiber gibi güçlendirici tabakalar uygun bir şekilde dizildikten sonra epoksi uygulanır.
3) Vakum yada bir pres yardımı ile sıkıştırma işlemi gerçekleştirilir.
4) Bu işlemden sonra, akış-konsolidasyon işlemi dahil olmak üzere kimyasal kürlenme reaksiyonlarının yanı sıra fiber/metal tabakaları arasındaki bağı içeren sertleşme işlemi gerçekleşir.
5) Son adım, genellikle ultrason, röntgen, görsel teknikler ve mekanik testlerle yapılan muayeneden oluşur.

Kür hazırlama aşaması, öncelikle parçanın torbalanmasını ve birçok yardımcı malzemenin yerleştirilmesini içerir. Kür hazırlama ile yapılan üretimler, Şekil 1.3'te gösterilmiştir.



Şekil 1.3. Vakum torbası sisteminin şematik gösterimi [2].

Son çalışmalar, FML'lerin reçine transfer kalıplama ile üretilmesinin mümkün olabileceğini göstermiştir. Bu teknik bit tür kapalı kalıplama düşük basınç uygulama yöntemidir. Bu yöntemin avantajları düşük performanstan karmaşık yüksek performanslı ürünlere, basit şekillerden karmaşık geometrili kompozitlere kadar birçok kompozit türünün üretilmesine izin vermesidir. Tüm reçine transfer kalıplama işlemlerinin ortak özelliği, reçine malzemesinin kuru elyaflar boyunca akışıdır. Reçinenin enjeksiyonu sırasında, kapalı kalıpta reçineyi takviye elemanı boyunca akmaya zorlayan bir basınç farkı uygulanır. Bu nedenle, takviye elemanını geçirgenliği önemli bir faktördür. İşlem tipik olarak epoksi gibi düşük viskoziteli hızlı kuruyan reçinelerle uygulanır. Genellikle takviye elemanı düşük olsa da %50-60 gibi yüksek oranların kullanıldığı çalışmalar da mevcuttur [15]. Fiber metal laminatların üretimindeki gelişmeler Tablo 1.2'de kısaca özetlenmiştir.

Tablo 1.2. Fiber metal laminatların üretiminde tarihsel gelişme.

Fiber malzemesi ve metal	Üretim teknikleri ve temel detayları	Kaynak/Tarih
Karbon/Cam Fiber-Al 6061	Karbon / Cam fiber ve Alüminyum 6061 alaşımı levha, oda sıcaklığında sıkıştırma-kalıplama kullanılarak üretilmiştir. Yoğunluk ve kütle dikkate alınarak lifin ağırlık oranı belirlenmiştir.	[16] 2016
Karbon Fiber Takviyeli Kompozit-Paslanmaz Çelik	Kompozit malzemeyi imal etmek için dokuma kumaş prepregleri kullanılarak sıcak pres yöntemi uygulanmıştır. Fiber takviyeli prepregler ilk önce paslanmaz çelik plakaların yüzeyine döşenmiş ve kalıplarda pres altında 2 saat boyunca 130°C sabit bir sıcaklıkta tutulmuştur. Ardından oda sıcaklığında 2 saat daha sertleştirilmiştir. Böylece, sıcak işlem sırasında, kompozit ve paslanmaz plaka bağlanmıştır.	[17] 2015

Karbon fiber, Cam fiber 304L paslanmaz çelik	Üretim otoklav kullanılarak gerçekleştirilmiştir.	[18] 2015
Cam / karbon fiber, Epoksi reçine, Al alaşımı 6061, Sertleştirici (HY 917)	FML paneli elle yatırma teknikleri ile hazırlanmış olup, ardından 150°C'ye ısıtılıp kürleme sırasında sabit bir basınç altında tutulmuştur.	[19] 2014
Alüminyum 2024 T3 ile güçlendirilmiş karbon fiber	70 kg/cm^2'lik bir basınçta ve 70°C'lik bir sıcaklıkta sıkıştırma kalıplama makinesinde on dakika boyunca preslenip ve oda sıcaklığında kürlenmiştir.	[20] 2013
2024 Alüminyum alaşım, fiber takviyeli polipropilen kompozit	FML'ler, kompozit, ara tabaka malzemesi ve metal katları bir çerçeve kalıbında istifleyerek üretilir. Yığın, bir pnömatik presde 7 barlık bir basınç altında 165°C'ye ısıtılıp, daha sonra oda sıcaklığına 5ºC/dk hız ile soğutulmuştur.	[21,22] 2009/2006
Cam fiber takviyeli termoplastik alüminyum alaşımlı 2024-T0	Kompozit ve alüminyum arasında yapışmayı sağlamak için, alüminyum alaşımına bir kromat kaplama uygulanmış ve kompozit-metal ara yüze bir polipropilen tabakası eklenmiştir. Laminatlar daha sonra soğuk bir preste preslemeden önce bir hava sirkülasyonlu fırında 185 ° C'ye ısıtılmıştır.	[13][12] 2000

Metal ve fiber takviyesi arasında iyi bir bağlanma sağlamak için, mekanik işlem, kimyasal işlem ve kuru yüzey işlemlerini kullanarak metal yüzeyleri geliştirmek gerekir. Mekanik aşınma mekanik işlemede kullanılan ilk adımdır, makro seviyede pürüzlü bir yüzey, yüzey dokularının farklı pürüzlülük seviyeleri üretmek ve ayrıca istenmeyen oksit tabakasını çıkarmak için kullanılır [23]. Bu yöntem, alt tabaka yüzeyinin zımpara kâğıdı ile zımparalanmasını içerir. Mekanik işlemler, malzeme topografyasını değiştirmek için alümina veya silika taneciği veya cam tanecikler ile farklı ince malzemeler kullanılarak yapılan püskürtme ön işlemini de kapsamaktadır [14,24]. Asitle aşındırma olarak da bilinen kimyasal işlem, yüzeydeki asidik çözeltinin işlemlerini, temel olarak bir kromik-sülfürik asit temelli asidik çözeltiyi içerir [25, 26]. Bu işlem, substratın bir potasyum dikromat ve sülfürik asit çözeltisine daldırılmasından oluşur. Tipik olarak, kimyasal işlem, yani asitle aşındırma, yağ alma, alkalin temizleme ve elektrokimyasal işlem arasında bir ara üretim basamağıdır [23]. Kimyasal ıslak işlem yerine metal alaşımlı yüzeyler için birkaç kuru işlem geliştirilmiştir: yapılan bir çalışmaya göre [23], Bir alüminyum substratın morfolojisini ve mikro yapısını modifiye etmek için lazer dokulama kullanılmıştır, bu da bağlanma mukavemeti ve dayanıklılığın artmasına neden olmuştur. İyon ışını ile geliştirilmiş biriktirme, yüksek enerjili argon iyonları ile vakum altında sıçratılarak yüzeyi temizleyen ve değiştiren bir işlemdir. İyon ışınında arttırılmış kaplamadan önce bir yüzey aktivasyon aşaması, özellikle de kumlama işlemi gerekebilmektedir [14]. FML'ler ile ilgili birçok çalışma literatürde mevcuttur bunlardan deneysel olarak yapılan bazıları Tablo 1.3'te özetlenmiştir.

Tablo 1.3. FML'lerde deneysel çalışma gerçekleştiren bazı yayınlar.

Temel Özellikler	Kaynak/Yıl
Karbon fiber ve cam elyaf takviyeli epoksi tabakaları içeren paslanmaz çelik fiber metal laminatlar için deneysel bir ağırlık düşürme etkisi araştırması yapılmıştır.	[18] 2015
Malzeme bileşenlerinin etkisiyle, FML'nin düşük hızlı darbe direnci etkisi üzerine tabaka oryantasyonu ayrıntılı olarak incelenmiştir. Sonuçlar tek yönlü dizilmiş örnekler ile karşılaştırılmış ve çapraz katlı bileşenlerin daha iyi darbe direncine sahip olduğunu tespit	[25] 2009

edilmiştir.

Mekanik bileşenlerin emniyet seviyesini artırmak için, araştırmacılar alüminyum ve karbon bileşimli FML üretmiş ve veri analizi ile hem deneysel hem de sayısal etki çalışması yapmışlardır.	[27]	2010
GLARE FML'nin düşük hızlı darbe tepkisi, farklı darbe hızında incelenmiştir. Ayrıca hasarın yapısı, şekli mikro görüntüleme yöntemleri ve tahribatsız ultrasonik tekniklerle incelenmiştir.	[28]	2011
Farklı örnek geometrisi ve yerleşim dizisinin GLARE numuneleri üzerindeki etkileri düşük hızlı darbe testi ile incelenmiştir.	[29]	2011
Numune büyüklüğü, impactor çapı, kompozit katman sayısı, metal katmanların GLARE numuneleri üzerindeki düşük hız etkisine katkısı araştırılmıştır.	[30-31]	2011
Gerilme oranının ve yerleştirme konfigürasyonunun, fiber metal laminat kombinasyonunun gerilme ve eğilme davranışına etkisi araştırılmıştır.	[19]	2014
Çarpma tertibatı kütlesinin, kat oryantasyonunun, metal kalınlığının ve plaka boyutunun düşük hızlı darbe tepkisi üzerindeki etkisi araştırılmıştır.	[32]	2013

Magnezyum bazlı FML'nin darbe tepkisi deneylerle belirlenmiştir. Görsel incelemeden ve ilk hasar enerji seviyesine göre daha küçük limitli metal tabaka üzerinde daha büyük bir kesme çatlağına sahip olması, magnezyum bazlı FML'nin, alüminyum bazlı FML'den daha az darbe direnci gösterdiği sonucuna varmıştır.	[33]	2012
GLARE örneklerinin darbe tepkisini araştırmak için aşamalı bir yarı-statik test ve düşük hızlı darbe testi gerçekleştirilmiştir. İki GLARE numunesi denenmiş olup, farklı dizilimlerin etkileri ve darbe hızı etkisi analiz edilmiş ayrıca sonuçlar sayısal simülasyonla doğrulanmıştır.	[34]	2012
Farklı metal bileşenlerin ve kalınlığın darbe tepkisi üzerindeki etkisi deneysel olarak incelenmiş ve elde edilen verileri sayısal modelleme ile doğrulamıştır.	[35]	2011

Sayısal analiz, çeşitli materyal bileşenlerinden oluşan FML'lerin özelliklerini incelemek için çok önemli hale gelmiştir. Sonlu Elemanlar analizini kullanan sayısal modeller, çeşitli çalışmalar için nispeten hızlı ve ucuzdur. Belirli malzeme özelliklerine ek olarak, doğrulama amacıyla sadece makul sayıda yapısal test gereklidir. Literatürde [16, 17, 24, 25] FML'lerin sayısal modelini bildiren sınırlı sayıda makale vardır. FML'lerin modellenmesi, plastik davranış, delaminasyon, çatlak büyümesi ve darbe yükleme ve yükleme oranının neden olduğu penetrasyon zorlu çalışmalardır [33,36]. FML'lerin makul sonlu elemanlar analizi, uygun eleman tipi seçimi, hasar kriterleri ve strain etkileri ile farklı bileşenlerin davranışlarını uygun şekilde içermelidir. FML'lerin genel modellenmesini ve simülasyonunu tanımlayan iki genel makale [33, 36] bulunmaktadır. Laliberte ve diğ. [38] GLARE'daki hasar mekanizmalarını incelemek amacıyla FML'ler için LS-Dyna'da kullanıcı tanımlı bir malzeme kodu geliştirdiler. Üç çeşit ara yüz modeli kullandılar: bağlı arayüz (elastik-plastik alüminyum, elastik prepregler), basit bağ ve tiebreak (elastik-plastik alüminyum ve hasarlı prepregler). Sonuncunun, etki performansının daha iyi tahminler sağladığı rapor edilmiştir. Fan ve diğ. [31] ABAQUS

/ Explicit'i, 150 m/s'ye kadar darbe hızlarına maruz kalan termoplastik bazlı FML'lerin sonlu elemanlar simülasyonunu gerçekleştirmek için kullandılar. Kompozit katmanlar, çekme dayanımı hasar kriterine sahip izotropik bir malzeme olarak ve alüminyum katmanlar, hıza bağlı davranış gösteren elasto-plastik bir materyal olarak modellenmiştir. Sonuçta ortaya çıkan hasar modları, maksimum kalıcı yer değiştirme ve deneysel sonuçlarla merminin kinetik enerjisinin bozunması arasında iyi bir uyuşma olduğunu bildirmişlerdir. Literatürde ABAQUS / Explicit ticari sonlu elemanlar metodu (SEM) yazılımı kullanarak FML'leri farklı yükleme altında modellemek için 3 yaklaşım vardır. FML'lerin bileşenleri için seçilen elemanların tipine, mekanik davranış tanımına ve hasar kriter seçimine göre ayrılırlar. İlk yaklaşımda [31], hem metal (çoğu zaman alüminyum) hem de kompozit katmanlar için katı elemanlar kullanılmıştır. Alüminyum alaşımı, hıza bağlı davranış gösteren bir elastoplastik malzeme olarak modellenirken, kompozit izotropik bir malzeme olarak modellenmiştir. İkinci yaklaşımda [36] 8 düğümlü katı eleman (C3D8R) ve 8 düğümlü kabuk elemanı (SC8R) sırasıyla alüminyum alaşımı ve kompozit katmanlar için kullanılır. Uygulanan modelde, karma katmanlar için Hashin hasarı başlatma kriterleri kullanılırken alüminyum levhalara herhangi bir hasar kriteri uygulanmamıştır. Ancak, metallerin ve fiber takviyeli polimer tabakaların arasındaki katmanların ve ara yüzün gerçekçi bir şekilde modellenmesinin düzlem-gerilme varsayımına sahip kabuk elemanların kalınlık gerilmeleri gerektirmesi nedeniyle bileşik katmanlar için kullanımı uygun değildir [27]. Öte yandan, ABAQUS'te kompozit tabakalar için yer alan hasar kriterleri sadece düzlem gerilme koşullarına sahip sürekli kabuk elemanlarına uygulanabilir. Tablo 1.4'te FML'lerin nümerik olarak incelendiği bazı çalışmalar özetlenmiştir.

Tablo 1.4. FML'lerde nümerik araştırma gerçekleştirilen bazı çalışmalar

Yazılım /Kod Kaynak	Metal ve Fiber Türü	Temel Özellikler
ANSYS [39][38]	ARALL ve GLARE	ARALL ve GLARE için gerilme ve eğilme dayanımı incelenmiştir.

ANSYS/ ABAQUS [20].	Al ve Mg/Karbon ve doğal jüt fiber	CARALL'ın bir kısmı karbon lifi doğal elyaf jüt (CAJRALL) ile değiştirilmiş olup ayrıca, CAJRALL'da kullanılan alüminyumu magnezyum ile değiştirilerek yapılmıştır.
ABAQUS [34].	Al/GFRP	Kompozitlerin detaylı bir 3D strese dayalı hasarını yakalamak için alt rutin VUMAT geliştirilmiştir. Metal tabakalar için Johnson Cook hasar modeli kullanılmıştır.
ABAQUS [40][39]	Titanyum / GFRP	Yapışkan tabakayı, metalik ve kompozit tabaka arasında açık sayısal modelle incelenmiş ve metal yüzlerdeki dış ve iç hasar etkilerini değerlendirilmiştir.
ABAQUS [35]	Al 2024-T3 / Cam Fiber ve Mg AZ31B-H24 / Cam Fiber	Metal Türü ve kalınlığının darbe direncine etkisi incelenmiştir.
ABAQUS [31]	2024-O Al alaşımı / cam fiber prepreg	Çarpma tertibatının büyüklüğü, hedef büyüklüğü ve çarpışma yeri sayısal olarak incelenmiştir. İstifleme katmanları arasındaki temas, çarpma tertibatı ile hedef arasındaki yüzeyden yüzeye temas, metal tabakalar için çekme dayanımı ve kesme hasar kriterleri, kompozit tabakalar için 2D Hashin hasar kriterleri bu simülasyondaki önemli parametrelerden bazılarıdır.

ABAQUS [27]	Al/ Karbon fiber	Kompozit tabaka için iki boyutlu strese dayalı Hashin hasar modeli kullanılarak farklı darbe enerjilerinin karbon bazlı FML üzerindeki etkisini göstermek için sayısal bir çalışma yapılmıştır.
LS-DYNA [37]	CARALL	Kompozit katmanların sürekli hasar mekanizmalarına dayalı, FML üzerinde düşük hız etkisi için bir model geliştirilmiştir. Sonuçlar, delaminasyonun düşük hız etkisinde önemli bir hasar olmadığını göstermektedir.

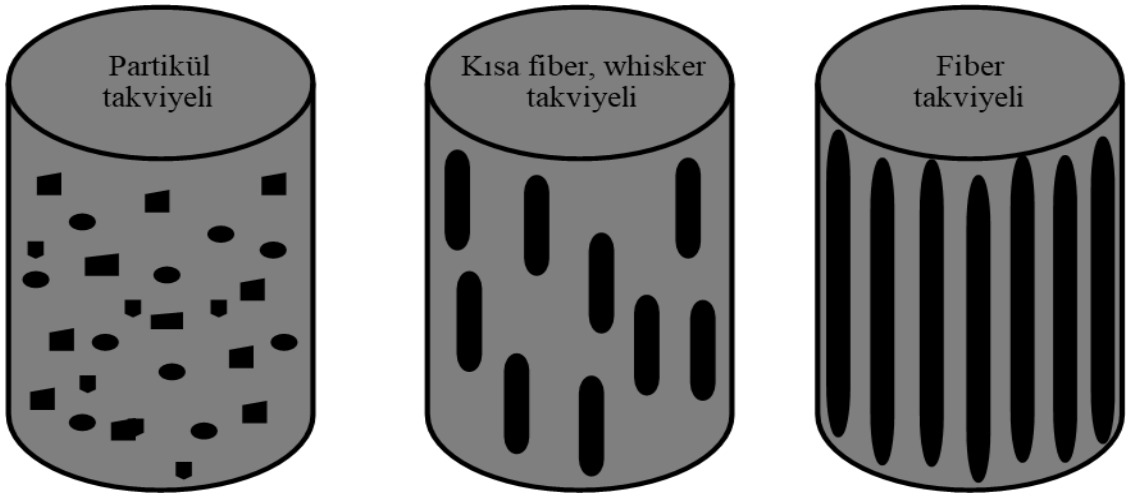
Tez çalışmamıza konu olan FML yapı metal matrisli kompozit ve polimer matrisli kompozitten meydana gelmektedir. Metal matrisli kompozit, SiC takviyeli Al6061 matrisli kompozitiken polimer matrisli kompozitimiz ise aramit ile güçlendirilmiş polimer matrisli kompozittir. Çalışmanın bu kısmında bu iki tür kompozit malzeme hakkında bilgi verilecektir.

1.3. Metal Matrisli Kompozitler

Metal matrisli kompozitler (MMK) tek başlarına yeterli özellikleri gösteremeyen az iki farklı malzemenin bir araya getirilmesi sonucu elde edilen yeni ve kendisini oluşturan malzemelerin özelliklerini birleştirerek yansıtan malzemelerdir. MMK'lar yaygın olarak güçlendirici bir veya birden fazla malzemenin ana malzeme içerisinde uygun bir şekilde yerleştirilmesi veya dağıtılması ile meydana gelirler. Güçlendirici malzemeye takviye elemanı ana malzemeye de matris elemanı denilmektedir. MMK'larda takviye elamanı genellikle fiber ya da partiküllerden oluşur. Matris elemanı da takviye elamanını saracak ve yük aktarımını kolay gerçekleştirebilecek malzemeler içerisinden seçilir. Seramik partikül takviyeli metal matrisli kompozitler metallerin yüksek süneklik ve tokluk kabiliyetleri ile seramiklerin yüksek elastik modül, yüksek mukavemet özelliklerinin bir araya getirilmesi sonucu oluşan üstün özellikli MMK malzemelerdir. [41-43]. MMK malzemelerin üretiminde kullanım amacına bağlı olmakla birlikte matris malzemesi

olarak genellikle düşük yoğunluğa sahip olan alümünyum, magnezyum, titanyum gibi malzemeler ya da bu metallerin alaşımları olan malzemeler kullanılmaktadır. MMK malzemelerinde tercih edilen takviye malzemeleri ise genellikle SiC, Al_2O_3, TiC, SiO_2 B_4C vb.dir. MMK'lar kullanım alanlarına göre temel olarak üç ana başlığa ayrılabilir bunlar; i) Şekil 1.4.a.'da görülebileceği üzere partikül geometrisindeki takviye fazının matris ana malzemesine eklenmesi ile elde edilen MMK'lar ii) Partikül takviyeli MMK malzemelere göre daha büyük yük aktarımının gerçekleşebildiği fakat daha maliyetli olan kısa fiber veya whisker takviyeli MMK'lar (bkz. Şekil 1.4.b). iii) Fiberin yüksek performans gösteren tüm özelliklerini barındıran fakat kompozit üretimi için dizaynının nispeten zor olduğu sürekli fiber takviyeli MMK'lardır. (Şekil 1.4.c).

Metal matrisli kompozit malzeme çeşitlerinin her birinin kendine özgü farklı pozitif ve negatif özellikleri vardır. Örneğin kısa fiber yada whisker ile güçlendirilmiş MMK'lar partikül takviyeli MMK'lara kıyasla daha pahalı ancak daha mukavemetli yapıdayken sürekli fiber takviyeli MMK malzemeler yüksek elastiklik ve mukavemet özelliklerini birleştirmelerine rağmen bu malzemelerin mekanik özellikleri anizotropiktir. Ayrıca kullanılan üretim yöntemi ve fiberlerin maliyeti diğerlerine göre daha yüksektir. Bunun yanında partikül takviyeli MMK malzemeler düşük maliyetlerine ek olarak mekanik açıdan neredeyse izotropik özellik göstermektedir [41-43].



Şekil 1.4. a) Partikül b) kısa fiber veya whisker c) sürekli fiber takviyeli kompozitler.

MMK'ların üretiminde kullanılan takviye malzemelerinin boy/çap oranları partiküllerde 1-4, kısa fiber ya da whiskerlerde 10-1000, sürekli fiberde ise >1000 değerlerindedir [44]. MMK'ları diğer kompozit malzemelere (seramik ve polimer matrisli kompozit malzemeler) ya da saf metal/alaşım malzemelere ve üstün kılan bazı özellikleri aşağıda özetlenmiştir.

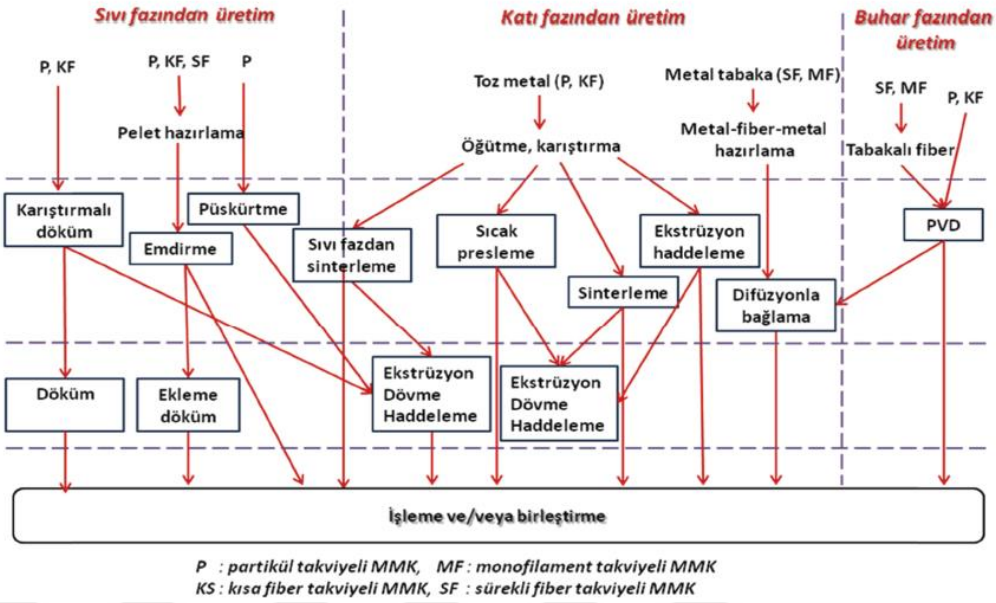
MMK'lar seramik matrisli kompozit malzemelere göre tokluk özellikleri daha iyidir, daha sünek özellik gösterirler, termal şoklara karşı daha dirençlidirler. Bunun yanında polimer matrisli kompozit malzemelere kıyasla daha yüksek çalışma sıcaklıklarına elverişlidirler, daha yüksek sertlik ve mukavemet özellikleri barındırırlar, elektrik ve termal iletkenlikleri daha iyidir, motaj kabiliyetleri daha yüksektir. Son olarak saf metal malzemelere kıyasladığımızda; spesifik mukavemet değerleri çok iyidir, bunun yanında artan mukavemetlerine oranla yüksek hafiflik kazancı gösterirler, üstün yorulma dayanımına sahiptiler, yüksek sıcaklıklarda daha dirençli bir yapıdadırlar.

Bu tez çalışmasında da üretip kullandığımız partikül takviyeli MMK'ların diğer MMK'lara kıyasla bazı üstün yanları şöyledir:

- Partikül takviyeli MMK'lar diğer MMK'lara göre daha ucuza mal edilirler.
- Matris ile takviye fazı arasındaki bağlantı diğerlerine göre daha mukavimdir dolayısıyla yük aktarma işleminde daha başarılıdırlar.
- Toz metalurjisi veya döküm ile elde edilmiş partikül takviyeli MMK'lar ekstrüzyon gibi ikincil işlemler için elverişlidirler.
- Mekanik dayanımlarının yönden bağımsız olma oranları diğer yöntemlere göre daha yüksektir [44].

1.3.1. Metal Matrisli Kompozitlerin Üretim Yöntemleri ve Literatür Bilgisi

MMK malzeme üretim metotlarını genellikle dört temel başlık altında gruplandırmak mümkündür. Ancak bazı üretim metotları birden fazla sınıfa dahil edilebilir. Bu sınıflar ve sınıflar içerisinde yer alan bazı yaygın üretim metotları Şekil 1.5'te sunulmuştur. Tez çalışmamızda MMK'ları üretmek için kullandığımız yöntem olan katı fazda üretim metotları aşağıda detaylı bir şekilde açıklanmıştır.



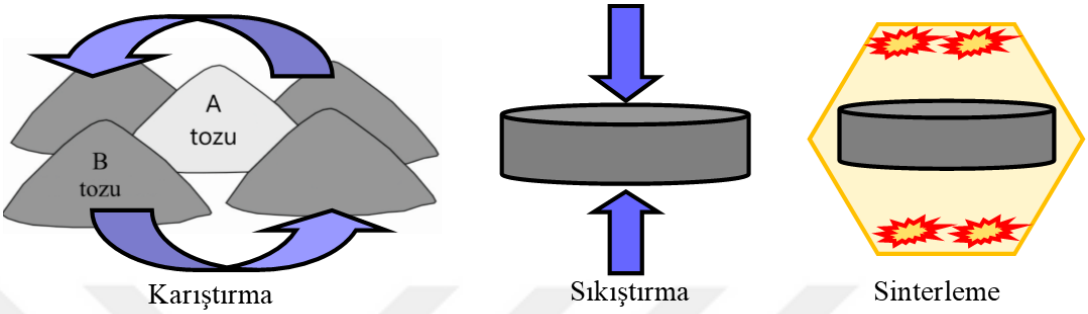
Şekil 1.5. MMK üretim metotları [45].

Takviye fazı olan partikül ya da fiberi katı haldeki haldeki matris malzemesi olan küt bir metal içerisine gömüp homojen bir şekilde dağıtmak çok güçtür. Bu nedenle katı faz üretim yöntemlerinde matris malzemesi olarak toz ya da folyo kullanılır. Bu yöntem ile MMK malzeme elde etmek amacıyla partikül yada fiberden oluşan takviye fazı, metal toz yada folyo ile karıştırılır ve ardından çeşitli proseslerden geçirilerek kompozit malzeme elde edilir. Katı halde üretim yöntemleri başlığı altında birçok üretim yöntemi mevcuttur. Bunlardan yaygın olarak kullanılan bazı metotlar aşağıda açıklanmıştır.

1.3.1.1. Toz Metalurjisi Metodu

Toz metalurjisi süreksiz güçlendirici fazlar ile elde edilen MMK malzeme üretim yöntemlerinden en yaygın olan yöntemdir. Toz metalürjisi ile üretim prosesinde takviye elemanı ve matris malzemeleri toz şeklindedir. Genel bir bakış açısı ile özetlenecek olursa bu metotta toz durumundaki takviye ve matris elemanları homojen olacak şekilde karıştırılır ve ardından kalıplanarak bir form haline getirildikten sonra sinterlenir. Kalıplama aşamasında tozların bağlanmasına yardımcı olmak ve kolaylaştırmak amacı ile tozlar hidrolik bir pres ve uygun malzemeden imal edilmiş kalıplar kullanılarak preslenerek sıkıştırılır. Sinterleme sıcaklığı belirlenirken bu sıcaklığın matris tozlarının ergime sıcaklığının altında ancak katı faz difüzyonu için yeterli bir sıcaklık olmasına dikkat edilir. Üretimin ardından MMK'nın son halini alması için ekstrüzyon veya haddeleme gibi ikincil işlemler uygulanabilir. Toz metalurjisi yönteminde ergitme ve

döküm gibi maliyeti arttıran işlemler olmadığı için maliyet açısından daha uygun bir yöntemdir. Ayrıca toz metalurjisi metodunu öne çıkaran bir yönü de döküm metotlarına göre daha kolay bir üretim yöntemi olmasıdır [46]. Genel olarak toz metalürjisi ile üretim yöntemi basamakları Şekil 1.6'da gösterilmiştir.

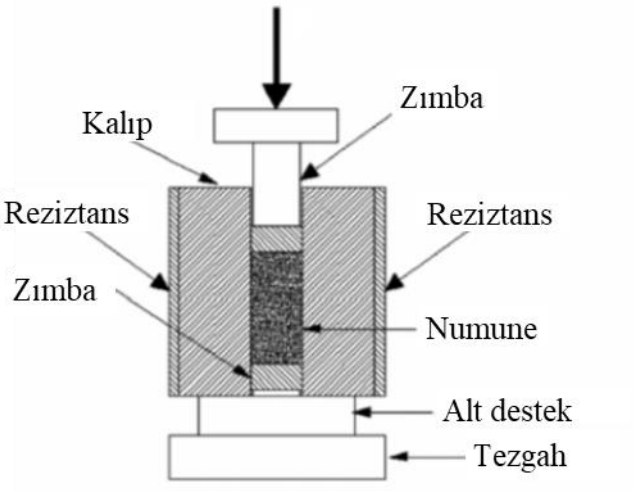


Şekil 1.6. Toz metalurjisi üretim yöntemi uygulama adımları.

Toz metalurjisi metodunda matris ve/veya takviye tozlarının pahalı olması, MMK'ların nihai özelliklerinin olumsuz etkilenmemesi için toz temizliğine en üst düzeyde dikkat edilmesi gerekliliği ve kullanılan tozlardan bazılarının atmosfer ortamındaki hava ile etkileşimi sebebiyle koruyucu ortamlarda muhafaza edilmesi gerekliliği toz metalürjisi metodunun dezavantajlarındandır. Bu metotta tozları karıştırırken, tozları daha kolay bağlamak amacı ile bağlayıcı malzeme kullanılıp kullanılmamasına göre ıslak ve kuru toz karıştırma olacak şekilde iki tür toz karıştırma yöntemi vardır. Islak yöntem de kullanılan bağlayıcı kolay buharlaşabilen, yüzey enerjisi düşük olan sıvıdır. Bu tarife uygun, kolay bulunabilen ve en yaygın olarak kullanılan bağlayıcı malzemelerden biri etanoldür. Etanolün kaynama sıcaklığı 80°C civarındadır. Bir diğer yöntem olan kuru birleştirme ile herhangi bir bağlayıcı malzeme kullanmadan tozlar karıştırılır ve dağılımın homojen olması için çeşitli yöntemler ile çalkalanır. Bu yöntemde bağlayıcı kullanılmadığı için kirlilik minimize edilmiş olur [47].

Tez çalışmamız için gerekli olan MMK numuneleri ürettiğimiz sıcak pres yöntemi bir tür toz metalürjisi ile üretim yöntemidir. Bu yöntemde uygun miktarda bir araya getirilmiş ve kalıplanmış tozlara presleme ve sinterleme işleminin eş zamanlı uygulanır. Sıcak pres metodunu geleneksel toz metalürjisi yönteminden ayıran yönü basınç ve sıcaklığın eş zamanlı uygulanması ile tozların difüzyon yeteneklerini arttırılmasıdır. Bu yöntem sinterlenme yeteneği düşük olan tozlardan kompozit malzeme elde etmek için uygun bir yöntemdir. Ayrıca sıvı fazda üretilmesi uygun olmayan malzemelerin üretimi

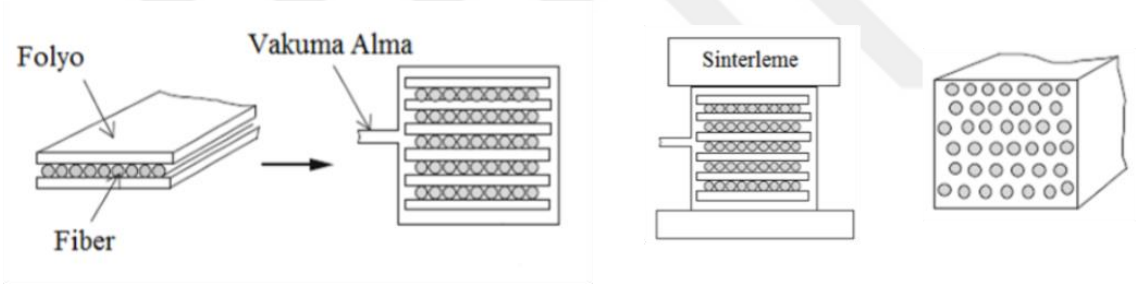
için kullanılan bir yöntemdir. Sıcak pres ile üretim yönteminde grafit kalıplar yada atmosfer kontrollü veya açık atmosfer ortamında yüksek sıcaklığa dayanıklı sıcak iş çeliği kalıpları kullanılır. Sıcak pres yönteminin geleneksel toz metalurjisi ile kıyaslandığında göze çarpan bazı özellikleri şu şekildedir [48,49]. i) Presleme ve sinterleme işlemi eşzamanlı olarak gerçekleştirilir dolayısıyla bir adımlı bir üretim prosesi söz konusudur bu durum sıcak presleme yöntemini zaman ve maliyet açısından avantajlı kılar. ii) Sıcak presleme yöntemi ile yazların difüze olabilme yetenekleri arttığı için bu yolla ile üretilen kompozitlerin teorik yoğunluğa ulaşması yani daha düşük poroziteye sahip olmaları daha kolaydır bu nedenle mekanik dayanımları daha yüksek kompozitler elde etmek mümkündür. iii) Sıcak presleme yönteminde hem üretim hem de ilk yatırım açısından kıvılcımlı plazma sinterleme yöntemine göre daha düşük maliyetlidir. Bu metodun temel kullanım alanları; aşınmaya direnci yüksek malzeme üretimi, hafif kompozit malzeme üretimi, implant malzemesi, zırh ve zırh delici malzemelerin üretimi, yüksek performans gösteren manyetik malzeme üretimi şeklindedir [48-50]. Bu yöntem tek ya da çift hareketli koçlar ile yapılabilmektedir. Bizim kullandığımız sıcak pres türü şekil Şekil 1.7'de bir şeması görülebilen tek eksende tek hareketli koçtan oluşmuş bir sistemdir [51]. Bu tür sistemlerde üst ya da alt destek plakası sabit olup kuvvet sabit olan plakanın tersi yönden hidrolik bir sistem ile uygulanır. Bu tip sistemlerde kuvvet tek eksenli olsa bile kalıp cidarlarının neden olduğu sürtünme sebebi ile merkezden cidarlara doğru değişen bir yük dağılımı meydana gelmektedir. Bu sebeple çok büyük boyutlardaki malzeme üretimi için bu yöntem uygun değildir.



Şekil 1.7. Tek eksenli ve tek hareketli kalıp ve koç sisteminin kesit görüntüsü [48].

1.3.1.2. Difüzyon ile Bağlama Metodu

Difüzyonla bağlama metodu yaygın olarak fiber ile takviyelendirilmiş MMK üretiminde tercih edilen bir metottur. Bu yöntemde levha veya folyo formunda olan matris ile takviye malzemesi olan levha ya da sürekli fiber malzemelerinin belirli yön, açı ve aralıklarda olacak şekilde dizilip ardından vakumlama ile hava ortamından arındırılarak malzemelerin erime sıcaklıklarının altında bir sıcaklıkta presleme işlemi ile gerçekleştirilir. Bu metodun uygulama adımları Şekil 1.8'de sunulmuştur. Kompozit malzemeyi oluşturan bileşenler arasında ki bağlantının daha iyi olması için gerektiğinde kompozit malzemeyi oluşturan alt malzemelere çeşitli kaplamalar yapılabilir. Bu yönteminde matris ve takviye malzemesi yüzeylerinin oksitsiz, düzgün ve temiz olması bağlanma kalitesi açısından oldukça önemlidir. MMK malzeme üretim yöntemleri içerisinden difüzyon ile bağlanma yöntemi maliyeti en yüksek olan yöntemlerden biridir. Ayrıca bu yöntemle karmaşık geometrili ürün elde etmenin oldukça zor olması bu yöntemi dezavantajlı kılmaktadır [47,52].

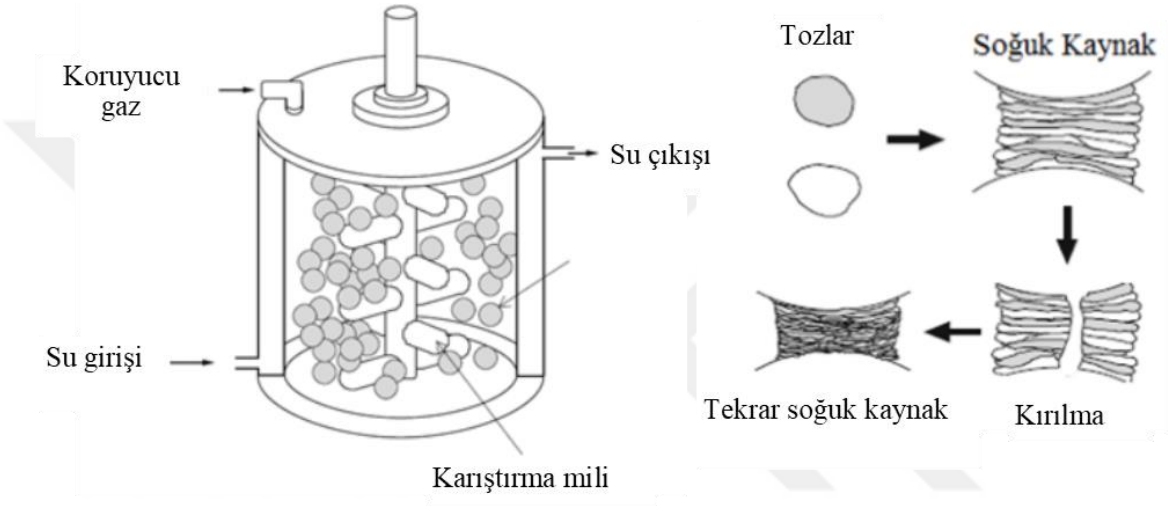


Şekil 1.8. Difüzyonla bağlama yöntemi uygulama adımları [47].

1.3.1.3. Mekanik Alaşımlama Metodu

Mekanik alaşımlama yöntemi bir değirmen içerisinde bulunan yüksek enerjili bilyaların değirmen içerisindeki toz parçacıklarının soğuk kaynaklanması, kırılması ve tekrar soğuk kaynaklanması döngüsünden meydana gelir. Şekil 1.9) Mekanik alaşımlama işleminin başlarında tozlar henüz alaşım haline değillerdir. Bu aşamada soğuk kaynaklanma mekanizması daha güçlü olduğu için tozlar tabaka halindendirler. Mekanik alaşımlama süreci devam ettiği için bu aşamanın sonrasında meydana gelen deformasyon sertleşmesi sebebiyle tabakalar gevrek bir yapıya bürünür ve bu andan itibaren kırılma mekanizmaları soğuk kaynaklanmadan daha güçlü hale gelir böylece tabakalar kırılmaya başlarlar (Şekil 1.9). Bu yöntemin en büyük avantajlarından biri de büyük ölçüde partikül topaklanmasının engellenmesi ve gayet homojen alaşımlar elde

edilebilmesidir. Süreç sonunda meydana gelen toz karışımları daha sonra klasik toz metalürjisi yöntemindeki gibi preslenip sinterlenir. Bu proses sıvı faz üretim yöntemi olan döküm gibi yöntemler ile karşılaştırıldığında, çalışma sıcaklıkları matris ve takviye malzemesi erime sıcaklığının altındaki sıcaklıklar olduğu için matris ve takviye malzemeleri arasında istenmeyen tepkimelerin de önüne geçilmiş olunur. Bunun yanında sıvı faz üretim yöntemlerinde oluşabilen yapı kusurları bu yöntem ile asgari düzeye indirilmiş olur [53,54].



Şekil 1.9. Mekanik alaşımlama cihazı ve soğuk kaynak, kırılma mekanizmaları [46].

1.3.1.4. Metal Matrisli Kompozit Darbe Davranışı İle İlgili Literatür İncelemesi

Aşağıda tez çalışmamızda darbe davranışlarını incelediğimiz FML'lerin bir bileşeni olan MMK'ların darbe davranışı ile ilgili yapılmış bir dizi çalışma özetlenmiştir. Sıcaklığın partikül takviyeli metal matrisli kompozitlerin (PTMMK) darbe davranışları üzerindeki etkisinin incelendiği ilk çalışmalardan biri Surappa ve Sivakumar [55] tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada araştırmacılar 100 °C, 24 °C ve -196 °C sıcaklıklarında, %10 Al_2O_3 takviyeli Al 2024 matrisli MMK'ların darbe davranışı incelenmiştir. Artan sıcaklıkla birlikte kompozitlerin absorbe edilen darbe enerjilerinin düştüğünü ve buna karşın takviyesiz alaşımlarının darbe absorblama yeteneklerinin daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Bu durumun sebebi, kırılgan Al_2O_3 partiküllerinin kompozitlerin darbe dayanımını düşürmesi olarak rapor edilmiştir. Partikül boyutu ve hacim oranı gibi mikro-yapısal parametrelerin MMK darbe davranışına nasıl etkide bulunduklarını araştıran birçok araştırma gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalardan ilk

yapılanlar arasında olan araştırma Kim vd. [56], tarafından gerçekleştirilmiştir. Kim vd., % 5, 10, 15, 20, 30 (hacimce) oranlarında takviye SiC pariküllleri ile güçlendirilmiş Al6061-T6 matrisli MMK'lar üretmişlerdir. Üretilen bu MMK'ların kırılma tokluğunu etkileyen mikro-yapısal parametrelerin etkisi araştırılmış ve takviye miktarındaki artış ile birlikte MMK'ların kırılma tokluğunda bir azalma olduğu saptanmıştır. Ekici ve Kosedag [57], SiC ve Pomza tozları ile güçlendirilmiş edilmiş Al matrisli MMK'ların düşük hızlı darbelere olan tepkilerini sonlu elemanlar yöntemini kullanarak yürüttükleri çalışmalarında incelediler. Pomza ile güçlendirilmiş kompozitlere göre SiC partikülleri ile takviye edlmiş MMK'ların düşük hızlı darbe altında daha rijit davrandıkları rapor edilmiştir. Bunun yanında takviye elemanlarının kalıcı eşdeğer gerilme ve şekil değiştirme dağılımlarını önemli miktarda etkilediği görülmüştür. Temas süresi ve kuvvetinin darbe hızı arttırıldığında bir artma eğiliminde olduğ ve bununla birlikte, takviye miktarının artması ile temas kuvvetinin arttığı ve temas süresinin azaldığı belirtilmiştir. Kurzawa ve Kacmar [58], Al_2O_3 ile güçlendirilmiş Al alaşım (AC-44200) matrisli MMK'ları sıvı üretim yöntemi olan basınçsız infiltrasyon ile elde ettikleri kompozitlere değişken sıcaklıklarda darbe testleri yapmışlardır. Takviye oranı %10-30 aralığında olan bu kompozitlerin test sıcaklıkları 25-300°C olarak uygulanmıştır. %10 ve %30 takviye oranına sahip kompozitlerin darbe dayanımı sırası ile %30 ve %60 oranlarında düştüğü tespit edilmiştir. Bunun yanında test sıcaklığının yükseltilmesi halinde darbe direncinde bir yükseliş meydana geldiği vurgulanmıştır. Bir başka sıvı üretim metodu ile yapılmış çalışmada Ahlatcı vd. [59] tarafından yürütülmüştür. Bu çalışmada basınçlı infiltrasyon ile %60 (hacimce) SiC takviyeli Al matrisli MMK'lar üretmiş ve partikül büyüklüklerinin bu MMK'ların basma mukavemeti, darbe davranışı ve aşınma direncine etkileri incelemiştir. Testleri Charpy yöntemi ile oda sıcaklığında yapılmış olup SiC boyutunun artması ile darbe dayanımında bir miktar azalma olduğu belirtilmiştir. Araştırmacılar bu sonucun sebebini partikül boyutunun artışı ile partiküllerdeki kırılma hasarının artması olarak belirtmişlerdir. Partikül boyutunun darbe davranışına etkisini araştıran Ozden vd. [60] tarafından yapılan çalışma ile çelişen Ahlatcı vd.'nin bu sonucun kullanılan takviye miktarları arasında yaklaşık %50'lik farktan kaynaklandığı düşünülmektedir. Bonollo vd. [61], 25 °C den 200 °C' ye değişen sıcaklıklarda %17Al_2O_3/Al 2014-T6 ve %20 Al_2O_3/Al 6061-T6 kompozitlerin darbe dayanımlarını incelenmişlerdir. %17Al_2O_3/Al 2014-T6 ve %20 Al_2O_3/Al 6061-T6 MMK'ların darbe dirençlerinin Al2014-T6 ve Al6061-T6 alaşımlarıyla

karşılaştırıldığında, en yüksek darbe direncine Al6061-T6 alaşımının sahip olduğu ve MMK'ların içerdikleri kırılgan partiküllerden dolayı daha düşük, alaşımların ise daha yüksek darbe direnci sergiledikleri rapor edilmiştir. Ek olarak Bonollo vd., test sıcaklığının, genel olarak yutulan enerjileri arttırırken, hasar mekanizmalarına önemli bir etkisinin olmadığını belirtmişlerdir. Ekici ve Kaburcuk [62], Sıcak presleme yöntemi ile üretmiş oldukları SiC/Al6061 MMK'ların düşük hızlı darbe davranışlarının takviye partikül oranı, darbe hızı, ve boyutu ile nasıl değiştiğini araştırmışlardır. %10, 20, 30 (hacimce) oranında ve yaklaşık olarak 356, 102, 37 μm boyutlarında SiC kullanılan çalışma deneysel ve sonlu elemanlar kullanılarak gerçekleştirilmiştir. ABAQUS/Explict paket programı ile de modellenmiş ve sonuçlar deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre takviye oranının azalması ve takviye boyutunun artması ile MMK'ların darbe absorbe etme yeteneklerinin geliştiği tespit edilmiştir. Bunun yanında yapılan modelleme ile deneysel sonuçlarında örtüştüğü belirtilmiştir. Karamis [63] ve ark. bir çalışmalarında seramik takviyeli alüminyum matrisli MMK'ların balistik davranışlarını araştırmışlardır. Bu amaçla SiC takviyeli AA5083 alaşım matrisli MMK numuneler takviye oranları %15, 30, 45 olmak üzere döküm metodu ile elde edilmiştir. 250-500 μm aralığında SiC boyutları seçilmiştir. Balistik testler için 7,62 ve 9 mm kalibreli mermiler kullanılmıştır. Sonuçlara göre MMK'lar takviye miktarı artması ile daha gevrek bir yapıya büründükleri tespit edilmiştir. SiC partiküllerini yoğunlaştığı bölgelerde oluşan çatlak oranlarının daha yüksek olduğu belirtilmiştir. Çarpma bölgesinde mermi temas kısımlarında sürtünmeden kaynaklandığı düşünülen ergimelere tespit edilmiştir. Ekici [64], MMK'ların darbe davranışına partikül oranının ve darbe enerjisinin etkisini aynı toplam enerji seviyesinde tek darbe ve tekrarlı darbe yüklemesi altında araştırmıştır. Çarpma süresi ve temas kuvvetinin toplam darbe enerjisinin artmasıyla arttığı bildirilmiştir. Tekrarlanan darbeler ile kompozit yapılar yoğun bir deformasyon sertleştirmesine maruz kaldığından rijitliklerinin artmasından dolayı, temas kuvvetinde bir artış ve darbe süresinde kısalma olduğu belirtilmiştir. Buna ek olarak, tekrarlı darbenin partikül takviyeli kompozitlerin enine merkezi deformasyonlarda azalma ve darbe absorbe etme kabiliyetlerinde düşüşe neden olduğu raporlanmıştır. Çentik darbe testi ile yapılan bir çalışma da Şahin [65], tarafından yürütülmüştür. $AlMg_3$ alüminyum alaşım matrisli %20 SiC takviyeli haddeleme ile şekillendirilen MMK'ların dinamik davranışlarının incelendiği bu çalışmada takviye oranının artması ile MMK'ların kırılması için yeterli

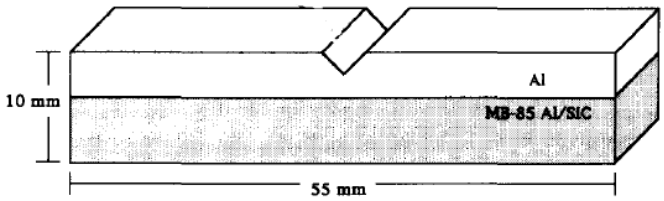
darbe enerjisinin azaldığı bildirilmiştir. Haddeleme işleminin MMK'ların akma dayanımı, çekme dayanımı, sertlik gibi mekanik özelliklerini arttırdığı halde çentik darbe dayanımını düşürdüğü raporlanmıştır. Farklı boyutlarda partikül boyutlarının MMK darbe karekteristiği üzerine Cerit [66], toz metalürjisi üretim yöntemini kullanarak bir çalışma gerçekleştirmiştir. Bu çalışmada tek ve çift parçacık boyutlu SiC partiküllerinin Al 2124 alaşım matrisli MMK'ların dinamik davranışı üzerindeki etkisini araştırmıştır. SiC kullanım parametreleri Tablo 1.5' sunulmuştur. Ağırlık düşürme ile gerçekleştirilen testler sonucu çift partiküllü takviye elemanı içeren MMK'ların tek partiküllü olanlara göre daha iyi darbe dayanımı sergiledikleri görülmüştür.

Tablo 1.5. Silisyum Karbür kullanım parametreleri [66].

Sembol	SiC Partikül Boyutu (μm)	Takviye Oranı (%)
Al2124	-	Takviyesiz
TP2 (Tek partiküllü 2)	2	10
TP53	53	10
TP167	167	10
ÇP2-53 (Çift partiküllü 2)	2 ve 53	5+5
ÇP2-167	2 ve 167	5+5
ÇP-53-167	53 ve 167	5+5

Lapin vd. [67], santrifüj döküm yöntemi ile insitü yapıda TiAl matrisli $(TiNb)_2AlC$ takviyeli MMK'ları Ti-44,5Al-8Nb-0,8Mo-0,1B-XC (X değeri % 1,4 ile %4,8 aralığında değişmektedir.) üretmiş ve ardından ısıl işleme uygulamışlardır. Elde edilen MMK'larda mikro yapı karekterizasyonun ek olarak charpy darbe testleri de gerçekleştirilmiştir. Oda şartlarında yapılan charpy darbe testlerine göre, MMK'larda yapıda karbon (C) miktarının artışının beraberinde darbe dayanımında bir azalışa sebep olduğu görülmüştür. Bunun nedenin üretim sırasında ortaya çıkan inter-metalik bileşikler olduğu belirtilmiştir. Al_4TiC, Al_4Fe_3C, Al_4Mo_2C, Al4WC ile güçlendirilmiş Al matrisli sıcak dövülmüş MMK'ların dinamik davranışlarının incelendiği çalışmalarında Narayan ve Rajeshkannan [68], darbe dayanımı en büyükten en küçüğe saf Al, Al4Mo2C/Al, Al4TiC/Al, Al4WC/Al, Al4Fe3C/Al olduğunu belirtmiştir. Bunun yanında doğrudan soğutulan MMK'lar için fırında soğutma uygulamasının su soğutma uygulamasından daha iyi bir darbe dayanımı sağladığı belirtilmiştir. Bu durumun fırında

soğutman uygulamasının sağladığı düşük soğuma hızı sebebiyle daha düşük dislokasyon yoğunluğu oluşumunun bir neticesi olabileceği söylenmiştir. İki tabaka halinde kompozit malzeme üreten Ellis ve Lewandowski [69], MB-85 Al (Al-Cu-Mg)/SiC MMK'ların üzerine Şekil 1.10'da görülebileceği üzere takviyesiz bir Alüminyum tabaka eklemişlerdir. MMK'ların içerdiği gevrek yapıdaki takviye elamanı nedeniyle kırılganlaştığı ve bu nedenle, darbe absorbe edebilme yeteneğinin azaldığını bildiren yazarlar eklenen Al tabakası ile kompozitin sünekliğinin artığını ve bu durumda darbe absorbe edebilme kabiliyetinin arttığını belirtmişlerdir.



Şekil 1.10. Tabakalı kompozit Numunesi [69].

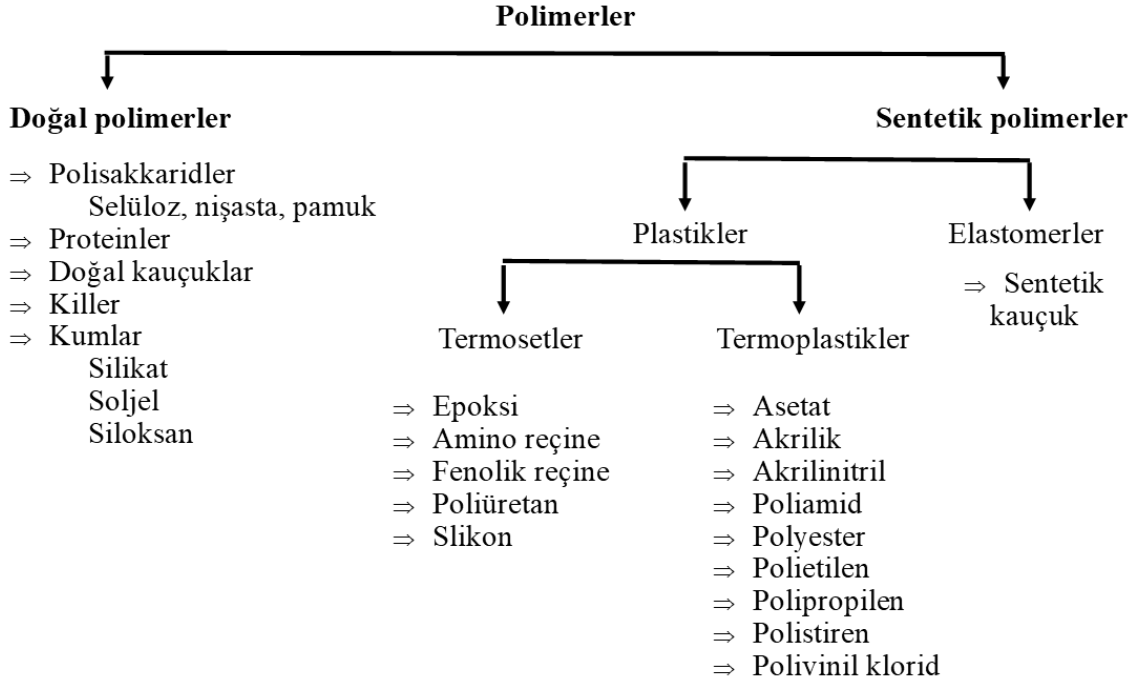
Sıcaklık ve üretim yöntemi ve ısıl işlemin etkilerini araştıran Ozden vd. [60] tarafından yapılan bir araştırmada, %10 SiC (ağırlıkça) takviyeli alüminyum matrisli MMK'lar döküm yöntemiyle üretilip 300 °C'den -176' °C ye farklı sıcaklıklarda Charpy darbe testleri yapmışlardır. Ozden ve arkadaşları çalışmalarında Al2124, Al5083, Al6063, Al6063-T6 alüminyum alaşımları ile 511 μm ve 157 μm olacak şekilde iki faklı boyutta SiC kullanılmışlardır. ek olarak, 13,63:1 ve 19,63:1 olmak üzere iki farklı ekstrüzyon oranı uygulamışlardır. Sonuçlara göre MMK'ların takviyesiz alaşımlara göre daha düşük bir darbe dayanımı sergiledikleri görülmüştür. Bu duruma üretimden kaynaklanan partikül topaklanması ve kümelenmenin neden olabileceği belirtilmiştir. Bunun yanında Al6063 alaşımının en yüksek darbe dayanımını sergilediği vurgulanmış, partikül boyutu ve ekstrüzyon oranı artışının darbe dayanımında artışlara sebep olduğu raporlanmıştır. Son olarak sıcaklıkta meydana gelen değişikliklerin darbe davranışı üzerinde önemli bir değişiklik yaratmadığı ve yapay yaşlandırma uygulamasının tüm MMK ve alaşımların darbe dayanımında bir düşüşe sebep olduğu bildirilmiştir. Sıcaklığın darbe davranışı üzerindeki etkisini inceleyen bir diğer çalışmada Wang vd. [70], TiB_2/Al kompozitlerin 200 °C' den'-50°C' ye farklı sıcaklıklarda takviye malzemesinin ve ısıl işlemin etkilerini incelemişlerdir. Hem TiB_2 güçlendirici fazının matris içerisindeki varlığının hem de ısıl işlemle yapılan yaşlandırmanın sebep olduğu çökelmelerin darbe tokluğunu azalttığı belirtilmiştir. Ayrıca, oda şartlarıyla

karşılaştırıldığında sıfırın altında ve daha yüksek sıcaklıklarda TiB_2/Al kompozitler daha yüksek darbe dirençleri göstermişlerdir. Isıl işlem etkilerini araştıran bir diğer araştırma Hasson vd. [71] tarafından gerçekleştirilmiştir. Araştırmada % 20 SiC (whisker) barındıran Al6061 matrisli MMK'lar ekstrüzyon ile üretilip bu MMK'ların darbe davranışına T6 yapay yaşlandırmanın etkileri incelenmiştir. Bunun yanında takviyesiz Al6061 T6 alaşımı ile kompozit numunelerden elde edilen darbe dayanımı sonuçları karşılaştırılmıştır. Al 6061-T6 alaşımının darbe dayanımının Al 6061/SiC-T6 kompozitin dayanımından daha düşük olduğu ve ısıl işlemin MMK darbe davranışına önemli ölçüde değişikliğe neden olmadığı vurgulanmıştır. Al6061 alaşım matrisli %20 Al_2O_3 takviyeli kompozitler üreten Unsworth ve Bandyopadhyay [72], bu kompozitlerde yaşlandırma süresi ile darbe davranışlarının nasıl değiştiğini araştırmışlardır. Artan yaşlandırma süresi ile takviye ve matris faz ara yüzeylerinde giderek yükselen ve bir takım reaksiyonlar sonucu meydana geldiği tahmin edilen inter-metalik Mg_2Si bileşikleri söz konusu MMK'ların gevrekliğini arttırmıştır. Bu sebeple, kırılgan sert Al_2O_3 fazları bulunduran MMK'ların nispeten gevrek bir duruma gelip darbe sırasında enerji absorbe etme kabiliyetlerinin düştüğü belirtilmiştir. Ayrıca, 175 °C sıcaklıkta 4 saat yaşlandırma işlemi uygulanan MMK'ların darbe dayanımında büyük bir azalış tespit edilmiştir. Bunun nedeninin yaşlandırma sertleştirmesinden meydana gelen gevrekleşme olduğu belirtilmiştir. Al_2O_3 ve SiC ve gibi partiküllere göre daha sert ve aynı zamanda daha hafif olan B_4C partikülleri kullanılarak Al matrisli MMK'ların darbe ve sertlik davranışlarının inceleyen Topcu vd. [73], ortalama partikül boyutu 10 μm, takviye oranı ise ağırlıkça % 5, 10, 15, 20 olarak kullanmışlardır. Darbe ve sertlik analizleri sonucu takviye oranı arttıkça kompozitlerin darbe dayanımında bir düşme, sertlik değerlerinde ise bir artış olduğunu kaydetmişlerdir. Ancak B_4C kullanılarak yapılan bir diğer çalışmada [74] Kosedag ve Ekici 100 mikron boyutundaki tozları kullanarak sıcak pres yöntemi ile elde ettikleri kompozitlerin darbe davranışlarını ağırlık düşürme yöntemi ile incelemiş ve elde edilen temas kuvveti zaman, temas kuvveti yer değiştirme, enerji zaman grafiklerini yorumladıklarında belirli bir orana kadar artan takviye oranı ile birlikte MMK'ların darbe absorblama yeteneklerinin arttığını ve belirli bir orandan sonra bu yeteneğin düştüğünü kaydetmişlerdir. Bu sonuç yapılan çalışmaların kapsamının arttırılması gerektiğini göstermiştir. Bu sonuçtan yola çıkarak aynı sonuçların SiC takviyeli kompozitlerde de olabileceğini öngörüp bizde tez çalışmamızda kullanacağımız takviye oranına karar vermek için ön deneylerde %5, 10,

15, 20, 30, 40 oranında takviye edilmiş kompozitlerin darbe davranışlarını analiz edip bu sonuçlara göre FML yapılarımızda kullanacağımız MMK takviye oranına optimum darbe absorblama, şekil değiştirme davranışı ve yoğunluğa göre karar verdik.

1.4. Polimer Matrisli Kompozitler

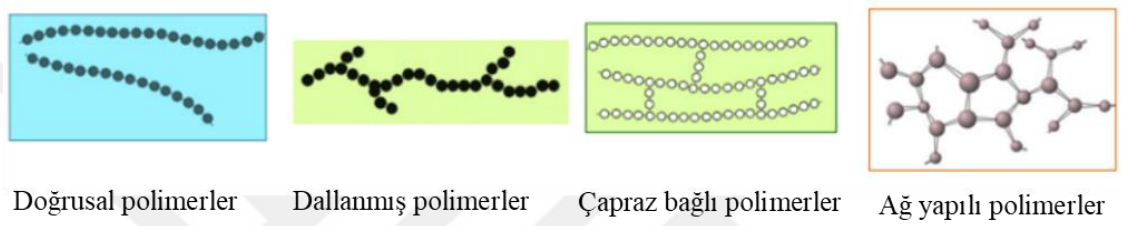
Matris malzemesi olarak polimer reçinenin, takviye elamanı olarak ise elyaf malzemesinin kullanıldığı kompozit sistemlere polimer matrisli kompozit (PMK) malzemeler denir. PMK'lar diğer kompozit malzemelere göre üretim kolaylığı, düşük maliyet, oda sıcaklığında üstün özellikler sergilemeleri sebebi ile kompozit malzemeler içerişimde en çok uygulama alanı görülen kompozit malzeme türüdür [75]. Polimer matrisli kompozitlerin en büyük dezavantajları yüksek çalışma sıcaklıklarında düşük performans sergilemeleridir. Birçok polimer çeşidi olmakla birlikte polimerler temel olarak doğal ve sentetik olmak üzere iki gruba ayrılır (Şekil 1.11).



Şekil 1.11. Polimer çeşitleri.

Matris malzemesini oluşturan polimerler daha alt birim olan monomerlerden meydana gelirler monomerler aralarında kovalent bağ bulunan birden fazla molekülün bir araya

gelerek oluşturduğu yapılardır. Polimerler bulunuşlarına, makroskobik yapılarına ve şekillendirilebilme kabiliyetlerine göre sınıflara ayrılırlar. Bulunuşlarına göre polimerleri doğal ve sentetik polimerler olarak ikiye ayırmak mümkündür. Makroskobik yapılarına göre polimerler zincir yapılarının şekline göre doğrusal, dallanmış, çapraz bağlı ve ağ yapılı polimerlerdir (Şekil 1.12). Son olarak şekillendirilebilme kabiliyetlerine göre sınıflandırıldığında ise termosetler, termplastikler ve elastomerler diye başlıklara ayırmak mümkündür [75]. Polimerleri Şekil 1.11'de gösterildiği üzere sınıflandırmak mümkündür.



Şekil 1.12. Zincir yapılarının şekline göre polimerler.

1.4.1. Termoset ve Termoplastik Polimerler.

Polimerlerin molekül yapılarına göre artan sıcaklıklardaki mekanik davranışı değişmektedir. Kademeli olarak arttırılan sıcaklıklardaki davranışlarına göre polimerleri termoplastik ve termoset olarak ayırmak mümkündür. Termoplastikler ısıtıldıklarında yumuşar ve ısıtılmaya devam edildiğinde sıvılaşırlar aynı zamanda ters süreç olan soğutulduklarında ise sertleşirler. Yani termoplastiklerde süreç geri dönüşlü ve tekrar edilebilirdir. Sıcaklık yükseldikçe moleküler düzeyde ikincil bağlar artan molekül hareketiyle azalır ve etki eden gerilim sebebi ile komşu moleküller arasında da hareket gerçekleşir. Termoplastikler genellikle doğrusal ve esnek zincir yapıya sahip polimerlerdirler. Termoplastikler yaygın olarak ısı ve basıncın aynı anda uygulandığı üretim yöntemleri ile üretilirler. En çok bilinen termoplastikler; polietilen, polistiren, polivinil klorürdür.

Termosetler ağ yapısında bulunan polimerlerdir. Kalıcı bir forma bürünüp daha sonra ısı ile yumuşamazlar. Ağsı yapıda komşu zincirler birbirlerine çapraz kovalent bağlı oldukları için ısıl işlem gördüklerinde bu bağ yapısı zincirleri birbirine kilitler ve yüksek sıcaklıklarda titreşime ve dönüşüme izin verilmez. Bu sebeple termosetler ısıtıldıklarında yumuşamaz ve geri dönüştürülemezler. Termosetler genellikle epoksi

reçineler, polyester reçineler, fenolik reçineler, silikon, poliamid, poliüretan ve siyanat olarak sınıflandırılabilirler. Termosetler genelde termoplastiklere kıyasla daha dayanıklı ve serttirler. Boyutsal kararlılıkları daha iyidir. Bu tez çalışmasında kullanılan polimer termoset ailesine ait epoksidir. Yapıştırıcı bir kimyasal olan epoksi reçineler kompozit malzeme yapımında kullanılırken çeşitli özelliklerde sertleştiriciler ile birlikte etkileşime girerler. Bu sertleştirici ve epoksi karışım oranı nihai malzemenin özelliklerini etkilemektedir bu nedenle kullanım yerine göre bu oran iyi saptanmalıdır. Epoksi reçineler tek başına yeterli mukavemet değerlerini göstermedikleri için çeşitli elyaflar ile güçlendirilirler [75,76].

1.4.2. Polimer Matrisli Kompozitlerde Kullanılan Takviye Malzemeleri.

Polimer matrisli kompozitlerde matris fazından beklenenler elyafı bir arada tutarak kompozit üzerine gelen yükü elyafa aktarıp homojen bir şekilde dağılmasını sağlamaktır. Kompozit malzeme gelen yükün büyük bir kısmını elyaf yani fiberler taşımaktadır. Matris fazından beklenen bir diğer özellik fiber malzemesini sararak fiberi mekanik aşınma kimyasal reaksiyon ve çeşitli çevresel etmenlerden korumasıdır bu bakımdan epoksi reçine iyi bir matris malzemesi adayıdır. Matris malzemesi çatlak ilerlemesinde önemli rol oynar elyaf kopmalarının birbirine direk aktarılmasını önler ve çatlağın yönünü bir miktar değiştirir. Bu bakımdan matris ve elyafın birbirlerine kusursuz bir şekilde bağlanması kompozit malzemenin yük taşıma bütünlüğü açısından son derece önemlidir. Bu sebeple matris fiber seçiminde, ara yüzey ve bağlanma özellikleri açısından dikkat edilmelidir. Yaygın olarak kullanılan fiber malzemeleri cam fiberler, karbon fiberler ve aramit fiberlerdir.

Cam fiberler

Cam fiberler temel olarak SiO_2 ve buna ek olarak sodyum, bor, alüminyum, kalsiyum gibi malzemelerin belirli oranlarda karışımlarının belirli sıcaklıkların üzerine çıkarılıp eriyik bir cam haline dönüştürüldükten sonra 5-20 mikron büyüklüklerindeki boşluklardan çekilmesi ve hızlı bir şekilde soğutulması sonucu elde edilir [77,78].

Karbon fiberler

Cam fiber kompozitlere kıyasla daha hafif olan karbon fiberli kompozit malzemeler cam fiber takviyeli olanlara göre daha iyi mukavemet ve rijitlik gibi mekanik özellikler

sergilemektedir. Karbon elyaflarda poliakrilonitril (PAN), zift (pitch) ve selüloz (rayon) ham madde olarak kullanılır. Üretimi kabaca özetleyecek olursak ham maddeden elde edilen karışım ilk olarak 5-10 kat bir uzama işlemine tutulur daha sonra çeşitli ısıtma proseslerinden geçirilerek karbonizason yapılıp ürün elde edilir. Sürekli ya da kırpılmış bir şekilde üretimi yapılabilen fiberlerde genellikle sürekli fiberler dokuma kumaş ve prepreg olarak kullanılırken kırpılmış karbon fiberleri yaygın olarak kalıpla üretimi yapılan kompozitlerin üretiminde kullanılır [77-80].

Aramit fiberler

Aromatik poliamid olan aramit polimer matrisli kompozit yapımında kullanılan bir diğer fiber türüdür. Aramit piyasada daha çok kevlar ve twaron ticari isimleri ile bilinirler. Aramit fiber denizcilik, otomotiv, havacılık ve askeri alan gibi sektörlerde birçok farklı amaçla kullanılabilmektedir. Askeri alanda daha çok balistik direnç özelliği sayesinde askeri kurşun geçirmeyen yelek, kask ve zırh üretiminde, çeşitli alanlar için koruyucu giysi üretiminde kullanılmaktadır. Ulaşım sanayinde yelkenli direği, lastik, emniyet kemeri, uçak ve tekne gövdesi gibi uygulama alanları mevcuttur. Ayrıca fiber optik kablolarda basınçlı kap, yüksek basınç ve ısıya dayanan conta imalatı vb. gibi birçok alanda da kullanılırlar. Ancak aramit fiberli kompozitlerin avantajları yanında bazı dezavantajları da mevcuttur. Bunlar ultraviyole ışın, asit ve tuzlara karşı hassas olmaları, matris ile düzgün bir birleşme olmaması halinde meydana gelecek mikro çatlakların malzemenin su emmesine sebep olması, aramit lif ya da kumaş formunda iken katlama ya da kesme gibi işlenmesinin zor olmasıdır. [78, 79, 81].

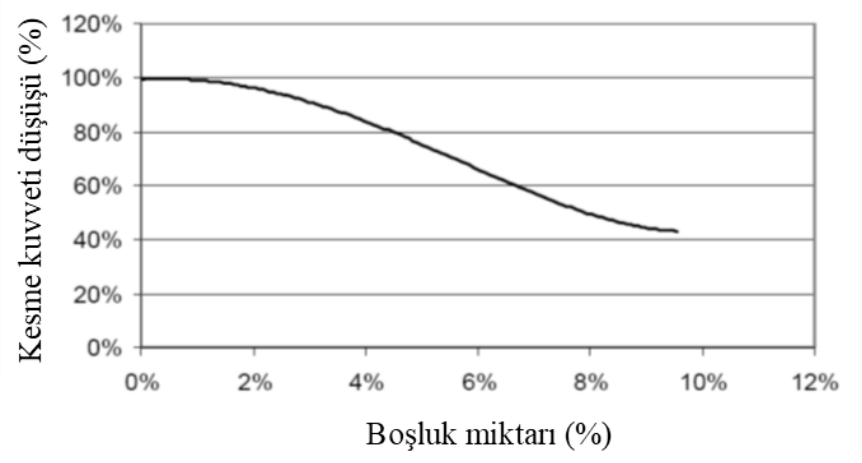
1.4.3. Polimer Matrisli Kompozitlerin Üretim Yöntemleri

Polimer matrisli kompozitler için birçok üretim metodu geliştirilmiştir. Termoset yapıda matris içerenler için bunlar reçine transfer ile kalıplama, el yatırma, püskürtme, vakum infüzyon, helisel sarma, otoklav ve prepreg yöntemi gibi metotlardır. Tez çalışmamızda kullandığımız yöntem olan prepreg ile üretim aşağıda açıklanmıştır.

1.4.4. Prepreg ile Üretim

Prepreg önceden hazırlanmış epoksi sertleştirici reçine sisteminim fiber kumaşa emdirilmiş haline verilen isimdir. Prepreg ile üretim yönteminde epoksi reçine ve sertleştirici karışımı fiber kumaşa emdirilir ve kullanılan epoksi ve sertleştirici miktar ve

türüne göre hazırlanan karışımın emdirildiği kumaş bu şekilde kürlenmeden oda sıcaklığında belirli bir süre ile yapısı bozulmadan muhafaza edilebilir. Epoksinin özel formülasyonu, ortam sıcaklığında sertleştirme işleminin önemli ölçüde yavaş olmasını (genellikle bir-iki hafta) ve donma sıcaklıklarında (genellikle olarak -15, -20 ° C arası) işlemin neredeyse tamamen durdurulmasını sağlar. Prepreg ile kompozit bir parça yapmanın en yaygın yolu, kürlenmemiş prepregi bir kalıba katmanlamak, kalıbı vakumlamak ve daha sonra bir otoklav veya fırında kürlemektir. Sadece kürlenme sıcaklığı olarak bilinen yüksek sıcaklıklarda, reçine reaksiyona girmeye ve düzgün bir şekilde kürleşmeye başlar, bu nedenle prepregler her zaman bir fırında kürlenmelidir. Prepregler için tipik kür sıcaklıkları 60 ° C ila 180 ° C arasında değişmekte olup, otoklav dışı prepregler için en yaygın kür sıcaklığı 100 ° C civarındadır. Prepreg ile üretimi avantajlı kılan en önemli yönü kürlenmeden kesildiği için karmaşık şekillerde kesilip döşenebilmesi ve küçük yapılarda üretilmeye elverişli olmasıdır. Ayrıca nihai ürün şeklinde kesildiği için malzeme sarfiyatı ve kompozit kesme maliyetinin önüme geçmektedir. Bunun yanında diğer yöntemlere göre koku ve tepkime açısından insan sağlığına daha az zararlıdır. Prepreg ile üretim yapmanın dezavantajlı yönleri prepregin raf ömrünün düşük olması yani prepreg hale getirildikten hemen sonra ürüne dönüştürülmesi gerekliliğidir. Prepregden kompozit eldesi için kullanılan asıl cihaz otoklavdır. Otoklav sıkıştırma ve kürleme işlemini aynı anda uyguladığı için optimum sonucu verir ancak otoklav oldukça pahalı bir üretim ekipmanıdır. Bu sebeple prepregten kompozit üretmek için alternatif yollar denenmektedir burada aslolan fiber içerisinde boşluk kalmayacak şekilde sıkıştırılması ve uygun sıcaklıkta uygun sürede kürlenmesidir. Şekil 1.13 de görüleceği üzere yapılan bir çalışmada boşluk miktarının artmasıyla kompozit malzemenin kesme mukavemeti üzerinde olumsuz bir etki bıraktığı anlaşılmaktadır [82].



Şekil 1.13. Boşluk miktarının kesme kuvveti üzerindeki etkisi [82].

Üretim esnasında vakumla ya da başka bir yolla prepreg üzerine gelen yük epoksinin fiber içerisine geçmesini sağlayacak yeterlilikte olmalıdır. Şekil 1.14'te görüleceği üzere uygulanan basınç epoksi karışımının fiberleri sarmasını ve dolayısıyla düzgün epoksi fiber dağılımlı bir yapının elde edilmesini sağlayacaktır.



Şekil 1.14. Epoksi karışımının fiberleri sarması[83].

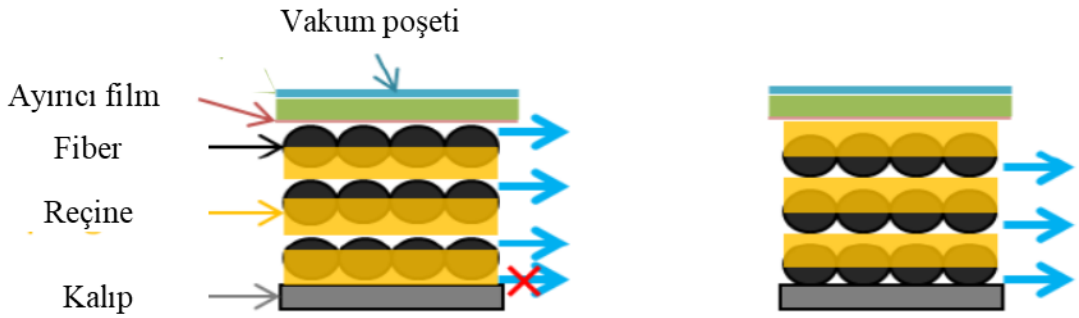
Prepreg ile kompozit üretirken dikkat edilmesi gereken önemli noktalardan biri de epoksi zengin olan prepreg yüzeyin yukarı yani basıncın uygulanacağı yöne geliyor olmasıdır (Şekil1.14). Şekil 1.15'te görüleceği üzere üretim yaparken uyulacak sıra şu şekildedir.

1.Prepregler şekil alınmasın istenen kalıp üzerine serilir.

2.Ayırıcı tabaka, hava akışını hızlandıran battaniye tabakası ve kalıplama naylonu serilir.

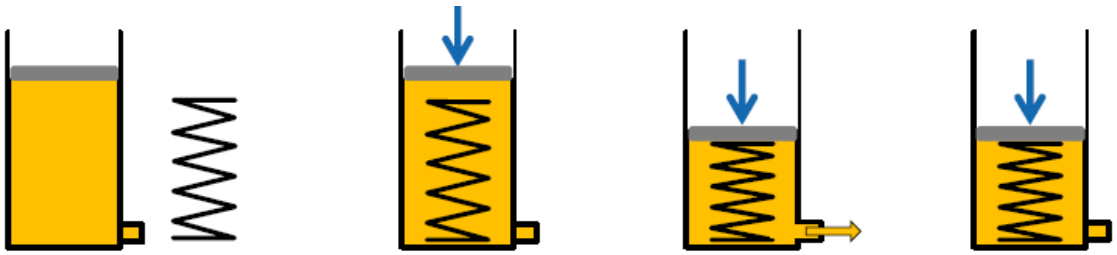
3. Vakumlama işlemi yapılır.

4. Kürlenmesi için uygun sıcaklıktaki otoklava ya da fırına konur.

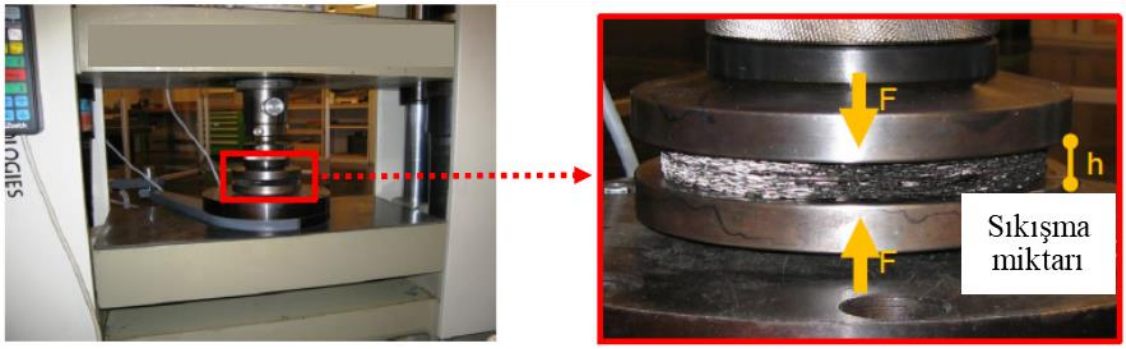


Şekil 1.15. Prepreg üretim şeması [83].

Isı ve basıncı eş zamanlı uygulamak için alternatif bir yöntem de metal matrisli kompozitlerin üretimi için kullanılan sıcak pres cihazıdır. Bu yöntemde Şekil 1.16'daki akışkan yay sistemi düşünülerek hareket edilirse uygulanan basınç yaya yani fibere temas ettiği anda epoksinin iyice sıkıştığı ve kalıp dışına taşmaya başlandığı görülür bu basınç kürlenme süresince sabit tutularak prerpregden kompozit numune üretimi de gerçekleştirilebilir. Ayrıca Şekil 1.17'de görüleceği gibi prepregin preslenmeden önceki kalınlığı ölçülür ve ulaşılması gereken nihai kalınlığa ulaşana kadar pres uygulanıp sabit yükte kalması sağlanır. Bizimde tez çalışmamızda kullandığımız sıcak pres yöntemi ile prepregin doğrudan metal matrisli kompozitlere yapıştırılması hedeflenmiştir. Böylece ekstradan bir yapıştırıcı kullanılmayacak olup bu durum modelleme aşamasında kolaylık sağlayacaktır.



Şekil 1.16. Prepreg ile üretim yapılırken referans alınan akışkan yay düzeneği [83].



Şekil 1.17. Sıcak pres ile prepreg üretimi

1.5. Kompozit Malzemelerin Darbe Davranışını Tespiti İçin Uygulanan Darbe Testleri ve Hasar Çeşitleri

Kompozit malzemelerin darbe davranışlarını belirlemek amacıyla kullanılan standart bir metot ya da bu alanda uluslararası otoritelerce ortak kabul edilen bir standart mevcut değildir. Bununla birlikte günümüzde yaygın bir şekilde kullanılan metotlar aşağıdaki verilmiştir:

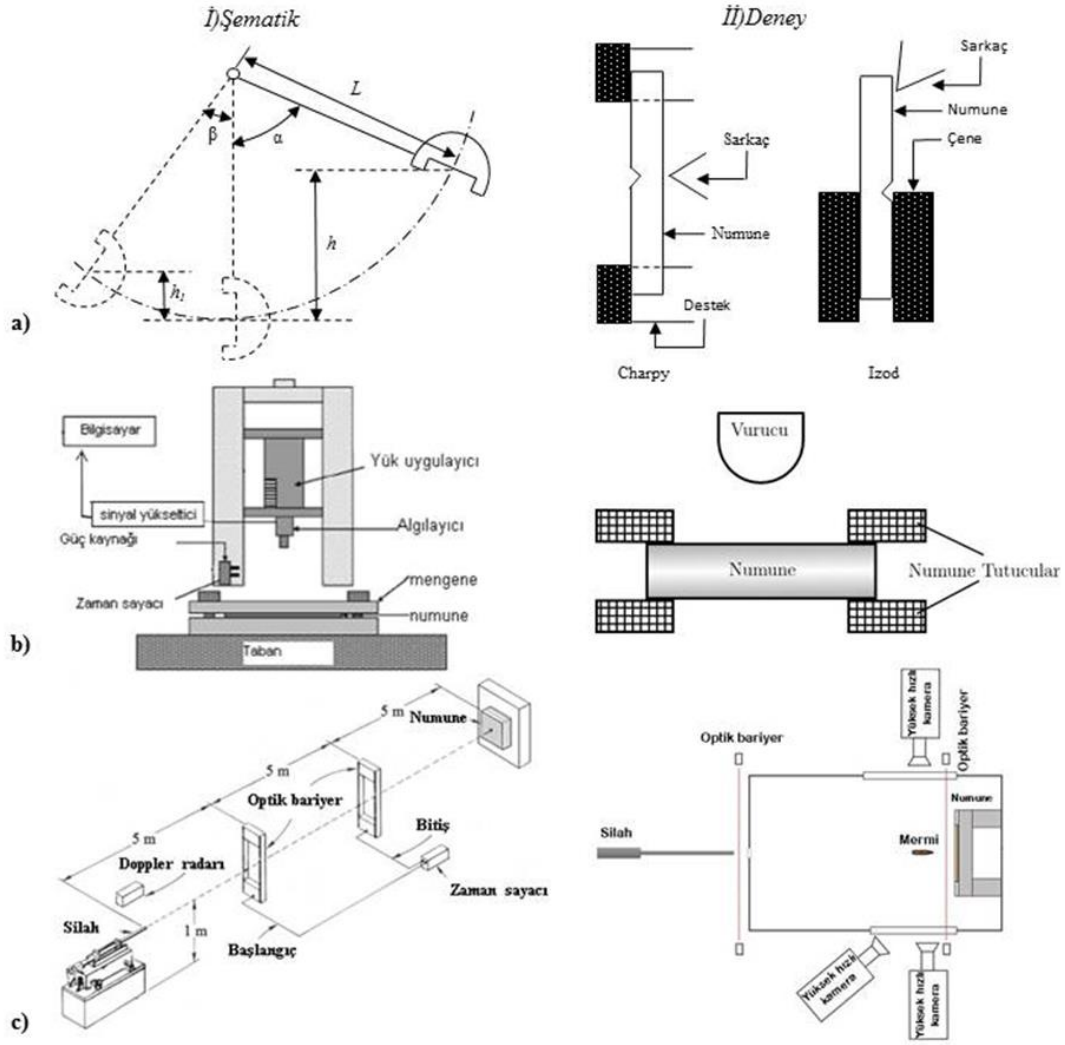
i) Sarkaç testleri: Charpy ve Izod testi

ii) Ağırlık düşürme testleri

iii) Gazlı ve havalı silah (balistik) testleri

Bu metotlarla ilgili detaylar ve şematik diyagramlar Şekil 1.18'de sunulmuştur. Darbeli yüklemeler yaygın olarak düşük hızlı ve yüksek hızlı olarak iki gruba kategorize edilmelerine rağmen, bunlar arasında kesin bir ayırım bulunmamaktadır. Ancak, düşük hızlı ve yüksek hızlı darbe ile kompozit malzemeye aktarılacak enerji miktarı farklı hasarlara sebep olacağı için, bu darbe çeşitlerinin sınıflandırılması oldukça önemlidir. Bu alanda yapılan araştırmaların bir bölümü düşük hızlı darbeyi, çarpan cismin rijitliği ve kütlesine, hedefin rijitliğine ve malzeme özelliklerine bağlı olarak 1-10 m/sn arasında değişen hızlar olarak belirtmektedir. Darbe türünün belirlenmesi için, enerji ve hız miktarının sahip olduğu önem kadar hasar türü de sınıflandırmada büyük öneme sahiptir. Düşük hızlı darbeler, çarpışma anında malzeme içyapısında küçük hasarlar ve/veya kalıcı deformasyona sebep olan darbe tipleridir. Düşük hızlı darbelerde, malzemenin içyapısında darbeye karşı cevap verebilmek için gerekli olan temas süresi yeterlidir ve sonuç olarak daha fazla enerji elastik olarak absorbe edilir. Yüksek hızdaki

darbeler ise çarpan cismin hedef malzemesine tamamen nüfuziyetinin söz konusu olduğu darbe çeşididir. Yüksek hızlı darbelerde çarpan cismin hedef malzeme üzerinde oluşturduğu gerilme dalgası etkisinde malzeme darbeye karşı cevap verebilme zamanına sahip olmadığı için, malzemede çarpan cismin nüfuziyeti ile oluşan hasar gözlenir.



Şekil 1.18. Yaygın olarak kullanılan darbe test metotları: a) Sarkaç testleri (Carpy ve Izod), b) Ağırlık düşürme testleri, c) Gazlı ve havalı silah (balistik) testleri [84].

Bir malzemenin darbe özellikleri, darbe veya şok yükü altındaki enerjileri emme ve dağıtma kapasitesini ifade eder. Metaller (ASTM E23) ve takviyeli olmayan polimerler (ASTM D256) için çeşitli standart darbe test yöntemleri mevcuttur. FML'lerin dinamik yükleme etkisini anlamak için temel olarak düşük ve yüksek hız testi yapılmalıdır. Düşük hızda darbe testi, serbest düşme sonucu bilinen ağırlığa ve çapa sahip yarım küre şeklinde bir kütlenin numune üzerine düşürülmesi ile gerçekleştirilir. Bu testlerin amacı,

FML'lerin etki tepkisini tanımlamak, hasar modlarını vurgulamak ve aynı zamanda ilk hasar ve hedef için eşik enerjilerini belirlemektir [21]. Mevcut literatüre göre, bu test yöntemlerinin FML'lere uygulandığını bildiren birçok çalışma vardır. Bu çalışmalar içerisinden bir kısmı FML'lerin düşük hızlı etki özelliklerini açıklamakta iken [11,13] diğer bir bölümü de FML'lerin yüksek hızlı etki özelliklerini ele almaktadır [11,22]. Gaz tabancası yardımıyla yapılan yüksek hızlı darbe testi basınçlı kaptan oluşmaktadır [11,22]. Darbe testi kare plakaların bir çelik destek kare açıklığına kelepçelenerek ve çarpma tertibatının test numunesinin ortasına vurulması ile gerçekleştirilmektedir. Bu test yönteminde: 25 ila 1000 m/s arasında değişen hızlarda hareket eden bir mermi gönderilmektedir. Merminin çarpmadan önceki hızı, ışık yayan diyot fotovoltaik hücre çiftleri kullanılarak ölçülmektedir. Testten sonra, numuneler darbe sırasındaki hasar mekanizmalarını incelemek için kesilebilir, parlatılabilir ve daha sonra optik bir mikroskop altında görüntülenebilir.

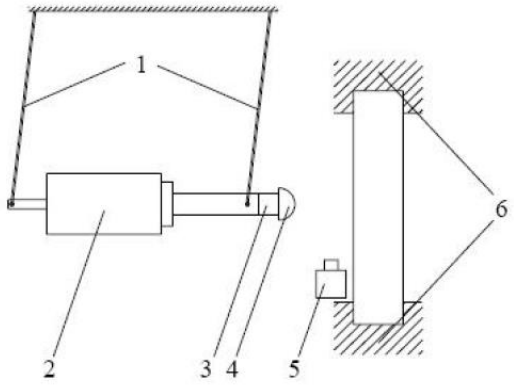
Darbe bir malzeme üzerine uygulanan anlık yük olarak tanımlanabilir. Darbe testlerini düşük ve yüksek hızda olacak şekilde kategorize etmek mümkündür. Çeşitli sebepler ile malzemeye etki eden darbe sonucu malzemede ortaya çıkacak hasarı tahmin etmek, malzemelerin enerji absorbe yeteneği, hasar mekanizmaları, kırılma tokluğu gibi dinamik özelliklerini belirlemek amacıyla darbe testleri yapılmaktadır. Uygulanan darbe testleri iki kategoride aşağıda özetlenmiştir.

1.5.1. Düşük hızlı darbe test yöntemleri

Düşük hızlı darbe test metotları pendulum, ağırlık düşürme, charpy ve izod yöntemleri olarak başlıklara ayrılabilir. Charpy ve izod birer çeşit sarkaçtır. Farklı şekillerde konumlandırılmış ve farklı çentikler açılmış numuneler üzerine belirli bir yükseklikten bırakılan çekicin enerjisinden numuneyi kırdıktan sonra ulaştığı yükseklik sonucu sahip olduğu enerjinin çıkarılması ile malzemenin absorbe ettiği enerjiyi veren yöntemdir. Charpy de çekiç numunenin çentik açılmamış yüzeyine gelecek şekilde numune yatay konumlandırılır. Buna karşın izod yönteminde çekiç düşey yerleştirilmiş numunenin çentik açılan yüzeyine ve çentiğin üst kısmına vurulur [85-87].

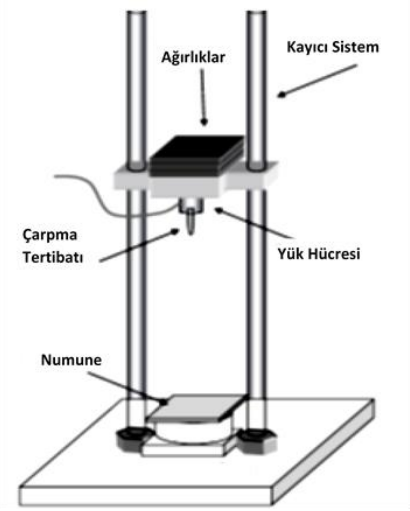
Pendulum darbe test metodu yatay konumdaki ağırlığın aynı doğrultudaki numuneye çarptırılması esasına dayanır. Şekil 1.19'da görüleceği üzere bu test düzeneği 1 numaralı iplere asılmış sistemde düzlemsel bir ağırlık (2), bu ağırlık ile 4 numara ile

temsil edilen vurucu uç arasına yerleştirilmiş yük hücresi (3), hız ölçüm sensörü (5) ve numuneyi sabitlemek için kullanılan sabitleyicilerden (6) meydana gelir.



Şekil 1.19. Pendulum darbe test metodu [85].

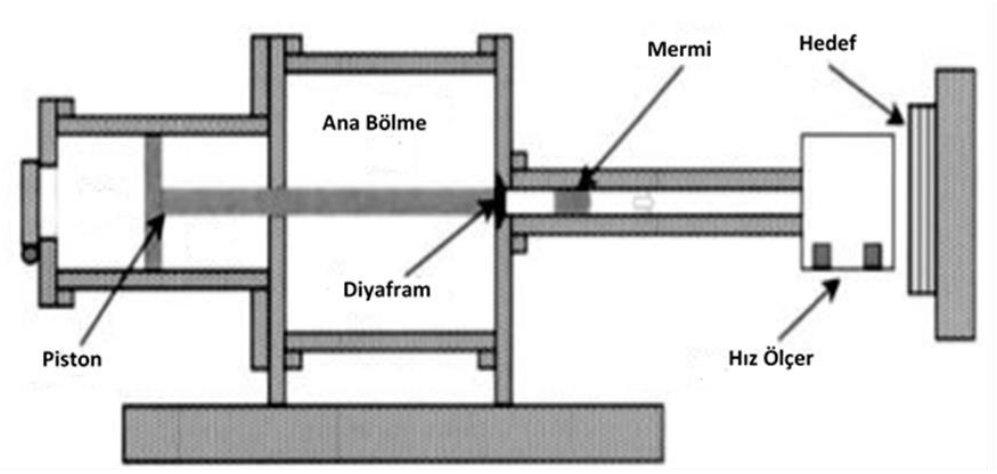
Ağırlık düşürmeli test yöntemi izod ve charpy'e göre malzeme dinamik özellikleri hakkında bizleri daha çok bilgilendiren bir yöntemdir. Bu yöntemde numuneye çarpma enerjisi ve hızı istenilen şekilde ayarlanan ağırlığın numune üzerine düşürülmesi esasına dayanır. Bu test yönteminde cihaz geri tepme freni ve yük hücrelerinden alınan verileri aktarma görevi gören bir veri yazılımına sahiptir. İstenilen hız için ağırlık hesaplanan yüksekliğe çıkarılır mesafe yetersizliği durumunda üst tarafta bulunan yaylar ile sıkıştırılarak enerji verilir. Vurucuya çeşitli geometrilerdeki uçlar takılabilir. Darbenin numuneye temasından sonra frenler ile vurucu tutulur ve tekrardan çarpmasının önüne geçilir. Darbe esnasında oluşan yük sinyalleri veri toplama ünitesine gönderilip işlenip oradan da bilgisayar yazılımına aktarılıp görüntülenir. Ağırlık düşürme testi için kullanılan bir ağırlık düşürme kulesi görüntüsü Şekil 1.20'de verilmiştir.



Şekil 1.20. Ağırlık düşürme kulesi [21].

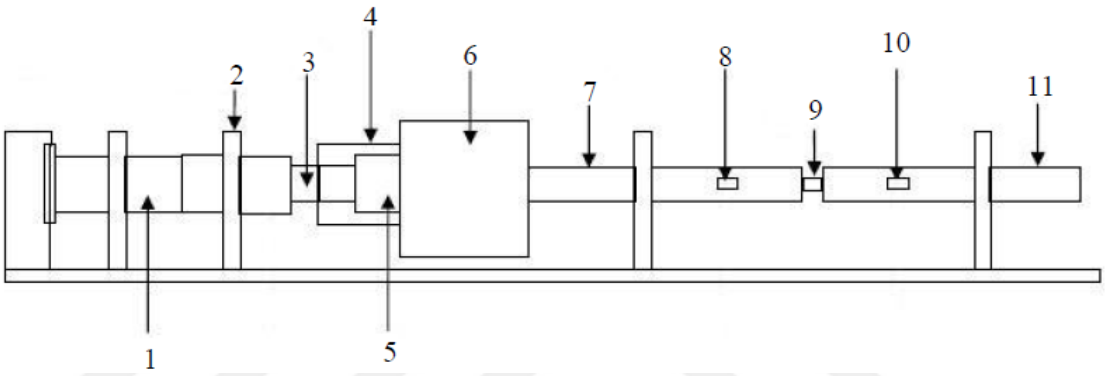
1.5.2. Yüksek hızlı Darbe test Yöntemleri

Bu metotlarda genellikle düşük ağırlığa sahip parçanın yüksek hızlarda hedefe atılması ile gerçekleştirilir. Genel olarak bu kategori altında basınçlı gaz test yöntemi ve Split-Hopkinson basınçlı çubuk test yöntemi vardır. Basınçlı gaz test yöntemi genellikle kütlesi 200 gramın altında olan parçacığın (mermi) 100 m/s den daha yüksek hızlara ulaşılmasını sağlayacak şekilde parçacığın arka tarafından gazın sıkıştırılması ile gerçekleştirilir. Şekil 1.21'de bir şeması verilen bu test yöntemi düzeneği tank içerisine sıkıştırılan havanın ikili diyafram sistemi kullanılarak diyaframı patlatmasından sonra mermiye hız vermesi ile çalışır. Mermi hızı hedef önüne belirli aralıklar ile yerleştirilmiş hız sensörleri ile ölçülür [88-89].



Şekil 1.21. Yüksek Hızlı Darbe Test Düzeneği [21].

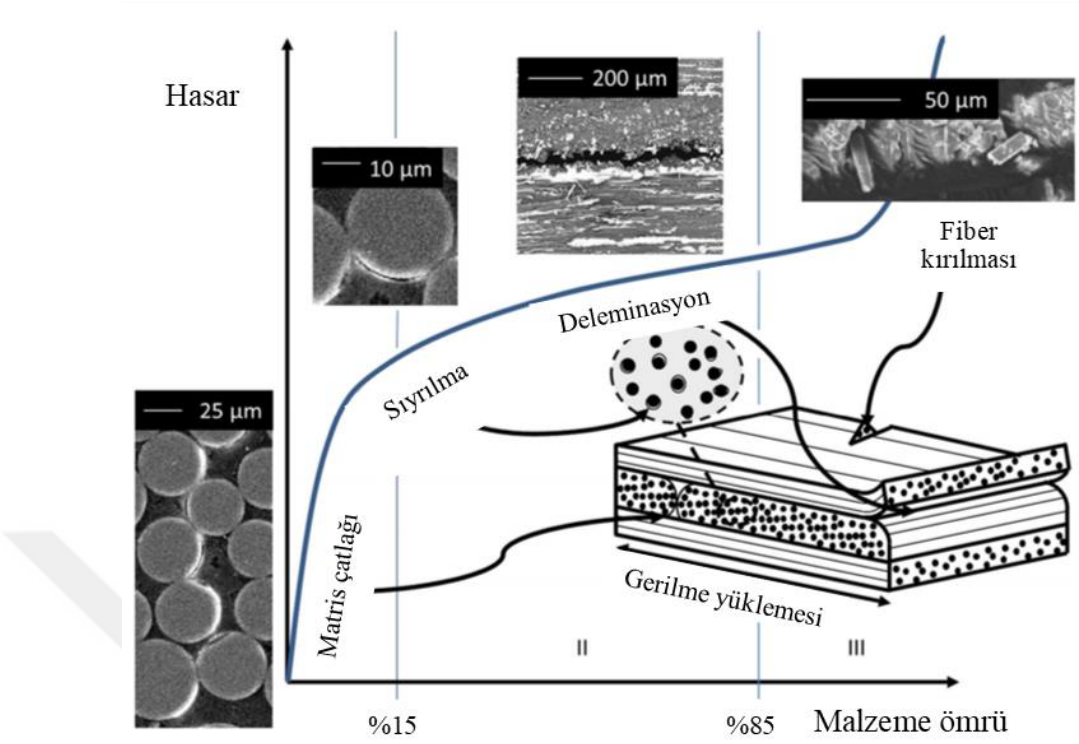
Diğer yöntem olan split hopkinson basınçlı çubuk test metodunda gaz tankında sıkıştırılan gazın etkisi ile iletilen vurucu çubuk eksenel bir darbe meydana getirir. Vurucu çubuk ve iletici çubuk üzerindeki strain guage ler yardımı ile veriler alınır ve bir toplayıcı ile işlenip bilgisayara aktarılır. Bu yöntemde şekil değiştirme hızı 100-5000s^{-1} değerlerine kadar ulaştırılabilir. Şekil 1.22'de şematik olarak bu test düzeneği gösterilmiştir. Sistem absorbe çubuğu (1), destek (2), giriş çubuğu (3), gaz tankları ve tüpleri (4,5,6), iletim çubuğu (7), strai guageler (8, 10), numune (9) ve çıkış çubuğundan (11) meydana gelmektedir [87,90].



Şekil 1.22. Split hopkinson basınçlı çubuk test cihazı şeması [90].

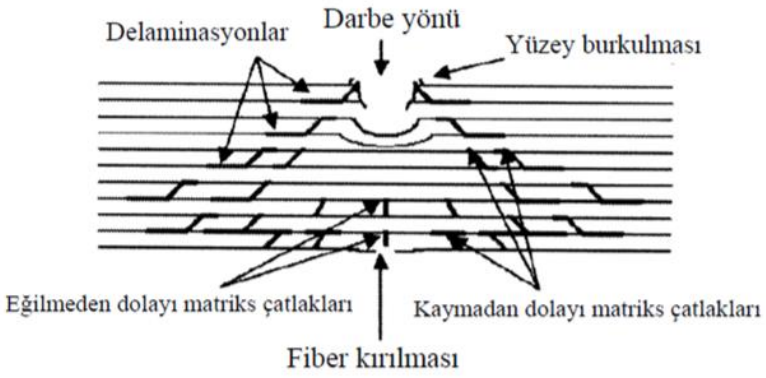
1.5.3. Hasar çeşitleri

Metal, alaşım, MMK, ve metal bazlı malzemeler darbeye elastik/plastik deformasyonlar şeklinde cevap verirken polimer bazlı fiber takviyeli kompozitler genellikle gözle görülebilen ya da çok az görülebilen, görülemeyen hasarlar şeklinde cevap verirler. PMK malzemelerde hasar tahribatlı ya da tahribatsız yöntemler ile muayene edilebilir. PMK malzemelere darbe uygulandığında genellikle delaminasyonlar, matriks çatlağı fiber kopması ve sıyrılma gibi hasarlar meydana gelir ve eğer uygulanan darbe enerjisi bunların hepsini aşacak kadar yüksek ise delinme gözlemlenir. Bir PMK ya yük uygulandığında Şekil 1.23'te görüleceği gibi sırasıyla önce matris kırılması ardından fiber soyulması daha sonra deleminasyon ve/veya fiber kopması gözlemlenir [91].



Şekil 1.23. PMK'larda hasar ilerlemesi [91].

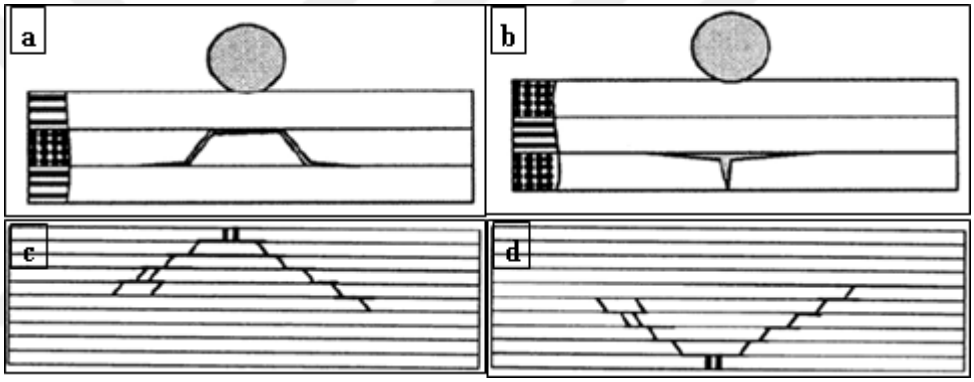
Şekil 1.24'te darbe yönüne göre tabakalı bir kompozitte darbe ile oluşan hasarlar malzemenin konumuna göre verilmiştir. Rijit yapılarda matris çatlakları darbe gören bölgenin yüzeyinde meydana gelen temas gerilmeleri sebebi ile oluşur. Darbeden sonra numunede karmaşık bir biçimde çokça matris çatlakları meydana gelir ve bunların tahmini zordur. Bunun yanında hasarın matris çatlağı ile başlaması tabaka ara yüzeylerinde delaminasyonlar meydana gelmesine sebep olur [92].



Şekil 1.24. Katmanlı bir PMK için darbe yönüne göre oluşan hasarlar [92].

Matriste oluşan hasar numune boyutu fiber dizilimi vb. etkiler ile değişir. Örneğin çeki çatlakları adı verilen çatlak türü (Şekil 1.25.a) düzlem içindeki normal gerilmelerin,

tabakanın fibere dik yöndeki mukavemet değerinin geçilmesi ile oluşur. Bir diğer çatlak türü olan kayma çatlakları (Şekil 1.25.b) ise orta yüzeydeki bir açıda meydana gelir ki, bu da fibere dik yöndeki kayma gerilmelerinin çatlak oluşumunda etkili olduğunu ispatlamaktadır. Ayrıca, numunenin kalın yada ince olmasına göre matris çatlakları değişmektedir. Söz gelimi kalın numunede darbeye maruz kalan ilk tabakada, yüksek ve lokal temas gerilmeleri sebebiyle matris çatlakları oluşur. Hasarın ilerlemesi ise Şekil 1.25.c'de görüldüğü üzere üst tabakadan alt tabakaya doğru çam ağacı şeklindedir. İnce numunelerde ise tabakanın en alt yüzeyinde oluşan eğilme gerilmeleri en alt tabakada matris çatlaklarına neden olur. Buna göre bu defa hasar ilerlemesi (Şekil 1.25.d) alttan üste doğru tersine dönmüş çam ağacı şekline benzer [88].



Şekil 1.25. a, b)Fiberin dizilimine ve c, d) kompozit yapının kalınlığına göre hasar çeşitleri [88].

Delaminasyon, tabakalar arasında yapışma etkisinin azalmasıyla oluşan, tabakanın mukavemetini önemli ölçüde azaltan ve tabakalar arası ayrılma ile sonuçlanan bir hasar çeşididir. Cam ve karbon fiber takviyeli PMK'larda fiberlerin gevrek bir yapıda olması sebebiyle darbe bölgesindeki yerlerde yüksek gerilmeler oluşur ve lokal bir deformasyon meydana gelir bu sebeple darbe enerjisi sınırlı bir alanda absorbe edilir. Ancak esnek bir yapıya sahip olan aramit fiber, PMK'ların darbeye maruz kalması ile darbe enerjisi tabakalar arasına yayılarak daha geniş bir alanda deformasyon oluşur.

2. BÖLÜM

DENEYSEL VE SAYISAL YÖNTEM

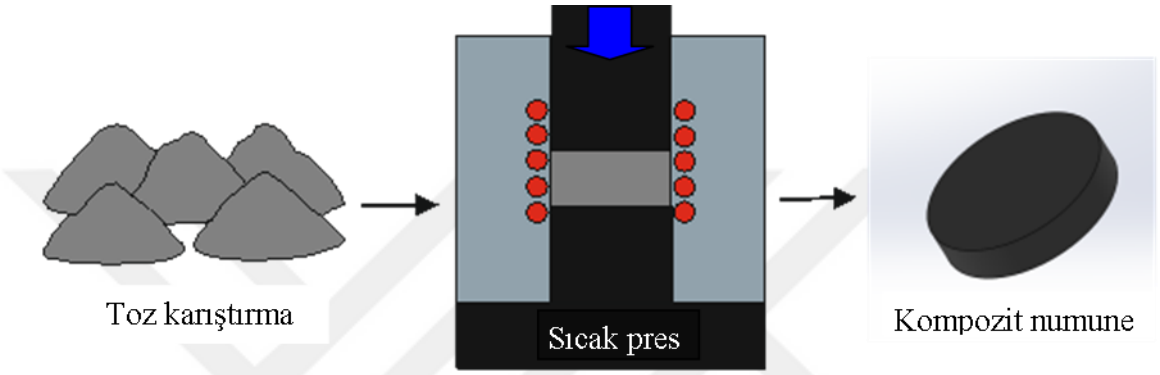
2.1. Deneysel çalışma

Tez çalışmamamız deneysel ve sayısal olarak iki temel aşamada gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışma üretim ve test bölümleri olarak iki bölümde incelenecektir. Sandviç yapımız metal matrisli ve polimer matrisli iki kompozit malzemeden meydana gelmektedir. Bu çalışmada ilk olarak metal matrisli kompozitlerin üretimi gerçekleştirilmiştir. Metal matrisli kompozitler toz metalürjisi yöntemi ve sıcak pres cihazı kullanılarak üretilmiştir. Üretimde kullanılan sıcak pres cihazının bir görüntüsü Şekil 2.1'de sunulmuştur.



Şekil 2.1. MMK üretiminde kullanılan sıcak pres cihazı.

Bu cihaz ile, klasik toz metalürjisi yöntemindeki presleme ve sinterleme aşamalarının ayrı ayrı yapılmasının aksine ısı ve basınç eş zamanlı uygulanmakta böylece tozların birbirine difüze olabilmeleri kolaylaştırılmaktadır. Bu metot Şekil 2.2'de görselleştirildiği gibi tozların karıştırılmasının ardından uygun kalıplara konup belirli bir basınç altında tozların erime sıcaklıklarına göre belirlenmiş belirli bir sinterleme sıcaklığında uygun görülen süre boyunca bekletilmesi esasına dayanır.



Şekil 2.2. Metal matrisli kompozit üretim şeması.

Bu tez çalışmasında metal matrisli kompozit malzemeler için matris malzemesi olarak Al 6061 tozu kullanılmıştır kullanılan Al 6061 alaşımının kimyasal kompozisyonum Tablo 2.1'de verilmiştir. Kullanılan Al6061 tozlarının boyutları yaklaşık olarak 30-40 mikron olup bu tozlar Nanografi® firmasından temin edilmiştir. Sandviç yapıdaki uygun olabilecek metal matrisli kompozitlerin takviye elemanına ve takviye oranına karar vermek için bir dizi ön deneyler gerçekleştirilmiştir. İlk olarak SiC ve B_4C olmak üzere iki farklı takviye malzemesi kullanılmıştır. Kullanılan takviye malzemelerinin boyutlarının birbirine yakın olmasına dikkat edilmiştir. Güçlendirici takviye elemanı olan SiC ve B_4C ye ait bazı mekanik özellikler Tablo 2.2'de sunulmuştur. Takviye malzemesine karar vermek için ilk olarak saf Al6061, %5, %10, %15 oranında SiC ve B_4C içeren kompozitler üretilmiştir.

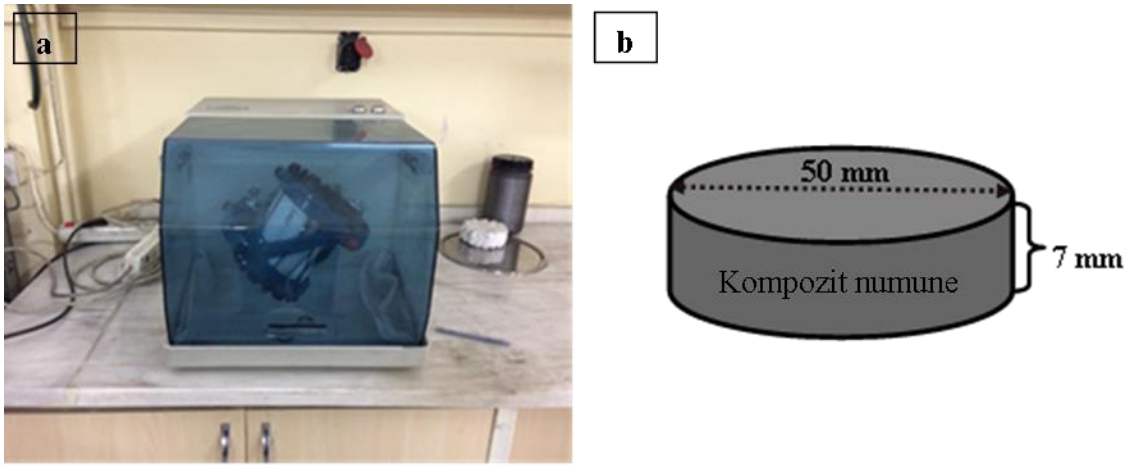
Tablo 2.1. Al6061 alaşımının kimyasal bileşimi.

	Al	C	Fe	Mg	Cr	Si	Mn	Ti	Zn
Al6061	Denge	Maks. %0.4	Maks. %0.7	Maks. %1.2	Maks. %0.35	Maks. %0.8	Maks. %0.15	Maks. %0.15	Maks. %0.25

Tablo 2.2. Metal matrisli kompozit malzeme bileşenlerinin bazı mekanik özellikleri.

	Yoğunluk (gr/cm^3)	Young modül (GPa)	Poisson oranı
Al6061	2,7	67	0,33
SiC	3,2	302	0,17
B_4C	2,5	410	0,18

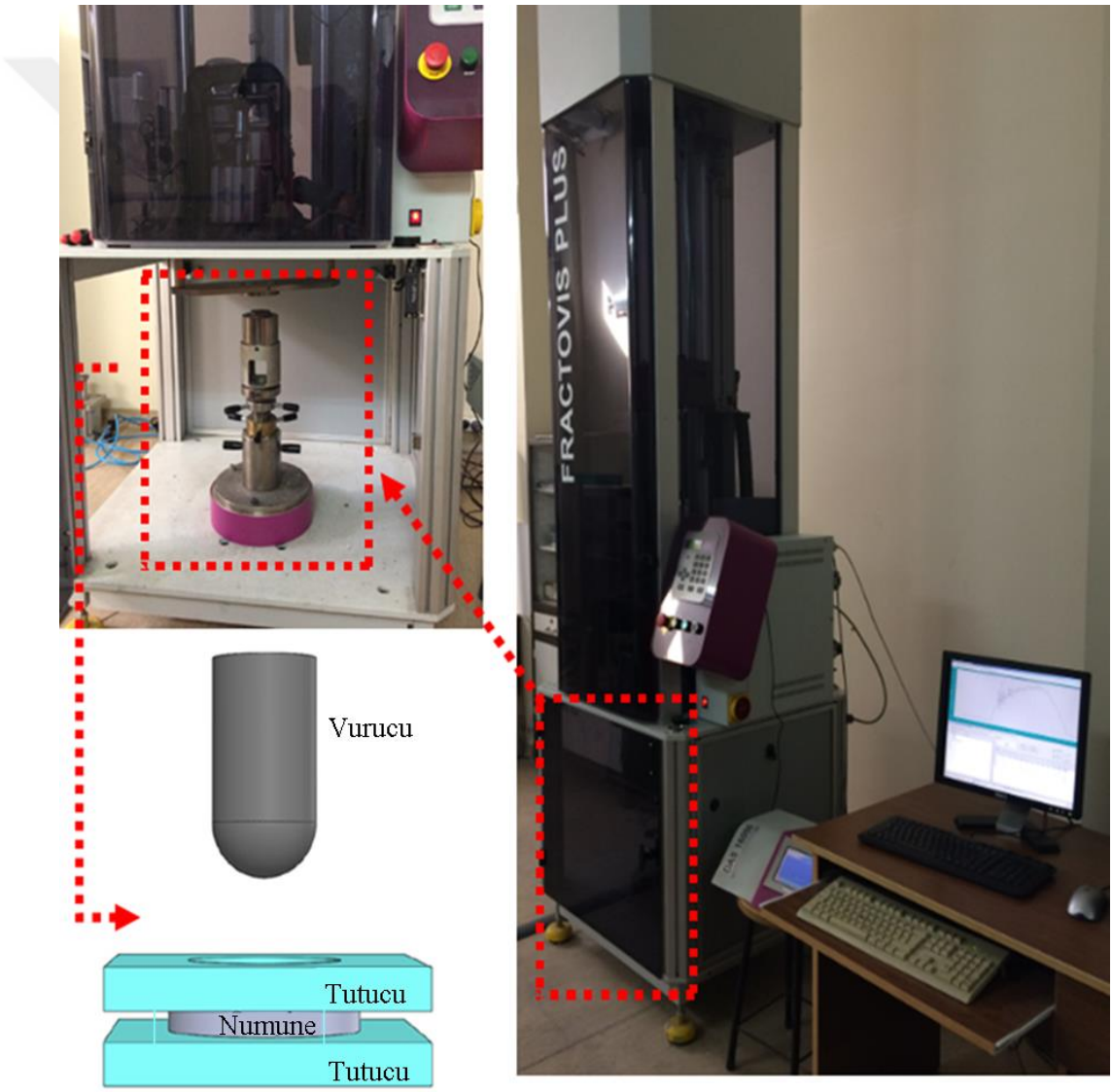
Üretimde kullanılan toz karıştırıcı, numune kalıbı ve nihai ön deney numunesinin boyutları Şekil 2.3'te verilmiştir. 50 mm çapında ve 7 mm yüksekliğinde ki numunelere düşük hızlı darbe testleri ağırlık düşürme yöntemi ile yapılmış olup kullanılan, Erciyes Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Mekanik laboratuvarında bulunan Fractovis Plus® marka test cihazı Şekil 2.4'te gösterilmiştir. Bu testler 50 joule enerjiyi sağlayacak şekilde 4,45 m/s hızında gerçekleştirilmiş olup yarı küresel 10mm yarıçaplı 5,045 kg kütleli uç kullanılmıştır ($0,5\times5,045\times4,45^2$= 50 joule). Test verileri bulgular kısmında detaylı bir şekilde tartışılmıştır. Elde edilen sonuçlar göz önüne alındığında yeterli mekanik dayanım, maliyet ve modelleme de göz önüne alınarak bundan sonraki metal matrisli kompozit numunelerinde SiC partikülleri kullanılmayasına karar verilmiştir.



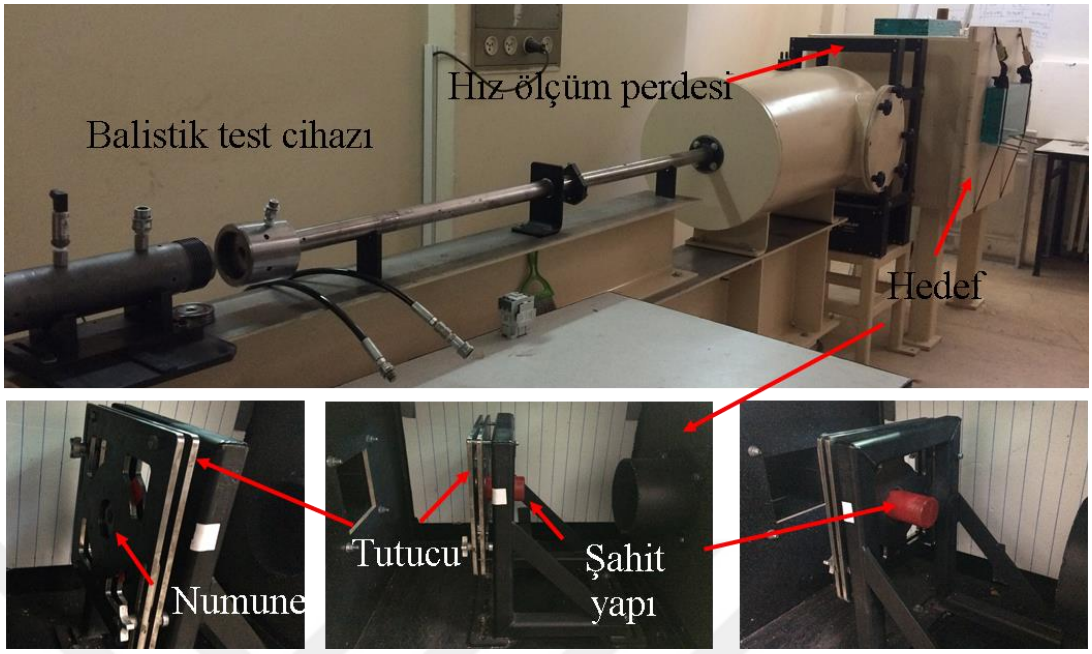
Şekil 2.3. MMK için toz karışım cihazı (a) ve elde edilen kompozit malzemenin geometrisi (b).

% 0, 5, 10, 15 takviyeli metal matrisli kompozitlerden elde edilen veriler göz önüne alındığında metal matrisli kompozitlerin belirli bir oranda takviyeye kadar farklı, bu

orandan sonra farklı davranış sergilediği görülmüştür. Bu sebeple SiC takviyeli kompozitlerin Takviye türünün arttırılmasına karar verilmiş bu bağlamda ek olarak % 20, % 30 ve % 40 oranında takviye SiC içeren metal matrisli kompozit numuneler üretilmiştir. Bu metal matrisli kompozit numunelere de düşük hızlı darbe testleri yapılmış ve sonuçlar bulgular bölümünde detaylı açıklanmıştır. Ek olarak kullanılacak metal matrisli kompozitlerin kalınlık be takviye oranına karar vermek adına yüksek hızlarda test yapılmaya karar verilmiş ve % 0, 10, 20, 30 oranında takviye elemanı SiC içeren 90 mm çapında ve 7 mm yüksekliğinde numuneler üretilmiştir.



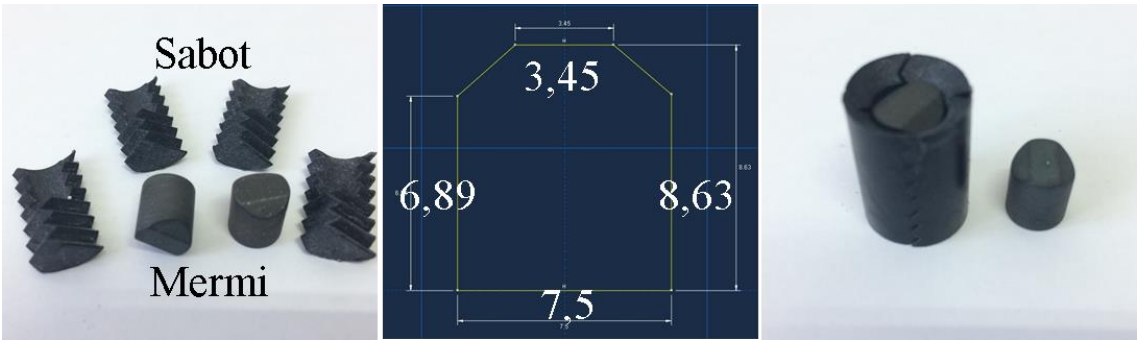
Şekil 2.4. Düşük hızlı darbe test cihazı.



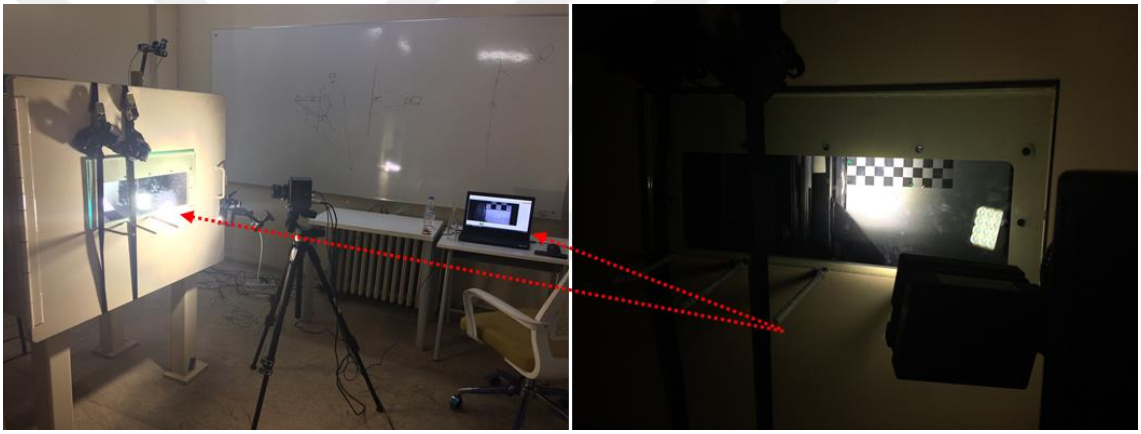
Şekil 2.5. Balistik test cihazı ve şahit yapı.

Balistik testlerin yapıldığı test sistemi Şekil 2.5'te verilmiştir. Bu cihaz helyum gazının sıkıştırılıp yüksek basınçlara çıkarılması ile mermiye gerekli hızı sağlamaktadır. Sıkıştırılan gazın önünde iki adet diyafram bulunmakta bu diyafarmların ön ve arka tarafında basınç farkı oluşturularak diyaframın patlaması sağlanmakta ve mermi fırlatılmaktadır. Fırlatılan mermi hedefin bağlı olduğu kabine girmeden önce ışık perdesi denilen sensörler arasından geçerken hızı ölçülmektedir. Ön deneyler kapsamında yapılan balistik testler için üretilen numuneler malzeme sarfiyatının önüne geçmek adına 7mm kalınlığında 90 mm çapında üretilmiştir. % 10, 20, 30 oranında takviyelendirilmiş metal matrisli kompozitlerin balistik dirençlerinin belirlenmesi için numune arkasına epoksi ve sertleştiriciden elde edilmiş bir şahit yapı yerleştirilmiştir (Şekil 2.5). Balistik ön deneyeler 500 m/s hızda gerçekleştirilmiştir. Bu şahit yapıdaki mermi ilerleme miktarı ve düşük hızda gerçekleştirilen testler sonucunda hacimce %20 oranında SiC takviye edilmiş Al6061 matrisli kompozitlerin FMMKL yapılar için uygun olduğuna karar verilmiştir. Kalınlığa karar vermek adına farklı kalınlıktaki numunelerin balistik dirençleri karşılaştırılarak 13 mm kalınlığın uygun olacağına karar verilmiş ve üretimlere bu doğrultuda devam edilmiştir. Balistik testlerde MIL-DTL-46593 ve STANG 2920 standartlarına uygun olan FSP (Fragment simulating projectile - mermiyi simüle eden parçacık) mermiler kullanılmıştır. Bu mermiler AISI 4340 çeliğinden imal edilmiş ve ısıl işlem işe 30±2 Rockwel C sertliğinde olmaları

sağlanmıştır. Mermi geometrisi ve ateşleme esnasında kullanılan sabot parçaları Şekil 2.6'da verilmiştir.



Şekil 2.6. Balistik testlerde kullanılan mermi geometrisi ve mermi sabot sistemi.



Şekil 2.7. Balistik testlerde görüntü almak için kullanılan kamera sistemi.

FMMKL yapıların balistik testlerinde mermi çıkış hızı ve numune davranışını gözlemlemek adına Photran® marka kamera kullanılmıştır. Kayıtlar 30000 FPS (Frame per second) de gerçekleştirilmiştir. Test kabinine mesafe belirlemek amacı ile damalı yapıda kağıt konulup mesafe tanımlaması yapılarak Photranın kendi ticari yazılımı ile hız ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Kamera sistemi Şekil 2.7'de verilmiştir. Bunun yanında FMMKL yapıların balistik testlerinde numuneyi delen mermilerin çıkış hızını belirlemek adına mermi çıkış doğrultusunda üç ayrı ölçüm alınıp aritmetik ortalamaları hesaplanmıştır. Merminin giriş hızı ve çıkış hızı bilindiği için numunelerin absorbe ettikleri enerji miktarları da hesaplanmıştır. Delinmeyen numuneleri kıyaslamak için numuneler testlerden sonra reçineden kalıplara alınmış ve elmas disk aracılığı ile merminin isabet ettiği yerden kesilmiştir. Böylece merminin penetrasyon miktarı kolaylıkla ölçülebilmiştir. Ayrıca, kesit görüntüsünün incelenebilmesi bu yöntem ile sağlanmıştır.

Metal matrisli kompozit malzemeleri oluşturacak toz miktarları takviye oranına göre hesaplanıp tartıldıktan sonra Turbula® marka karıştırıcı ve çalkalayıcı cihaz ile 3 saat boyunca karıştırılmıştır. Tablo 2.3'te kompozit numuneler üretilirken hacimce % oranlarına göre kullanılan toz miktarları verilmiştir. Tüm Al6061 matrisli kompozitler 60MPa basınç ve 620℃ sıcaklık ortamında üretilmiştir. Isıtma rampası olarak dakikada 10℃ olacak şekilde cihazın ısınması sağlanmış böylece sinterleme sıcaklığına 62 dakikada ulaşılmış bu sıcaklık sabit tutularak 1 saat boyunca numunelerin eş zamanlı basınç ve ısı altında sinterlenmesi sağlanmıştır. Sinterleme işlemi bittikten sonra 20 saat boyunca kabin içerisinde kendiliğinden soğuma sağlanmıştır. Kullanılan tozların herhangi bir reaksiyona girmemesi adına tozlar vakumlu kaplar içerisinde muhafaza edilmiş ve Üretime başlanmadan önce sıcak pres içerisindeki havanın boşaltılması için vakumlama ve argon gazı verilme aşamalarından oluşan süpürme işlemi gerçekleştirilmiştir. Ayrıca üretim süresi boyunca kabin içerisine sürekli olarak inert olan argon gazı koruyucu olması amacıyla verilmiştir. Sıcak iş çeliğinden oluşan kalıplar (Şekil 2.8) ve üretilecek numunelerin kalıba yapışmasının önlemek içim grafit yağlayıcı sprey kullanılmıştır. Elde edilen tüm numunelerin ön deneyler için kullanılanları ve tabakalı yapı için kullanılanların tamamı Şekil 2.10'da verilmiştir. Polimer takviyeli kompozitler ile bir araya getirilecek polimer matrisli kompozitlerin yeterli mekanik dayanımı göstermesini etkileyen en önemli unsurlardan biride ara yüzeylerinin temiz olmasıdır. Bunun için üretilen metal matrisli kompozitler öncelikle temizlenmek amacı ile üç çeşit farklı boyutlardaki zımparalar ile temizlenmiş daha sonra yüzeyi etil alkol ile silinip kurutulmuştur (Şekil 2.9).

Tablo 2.3. Kompozit numuneler için kullanılan toz miktarları.

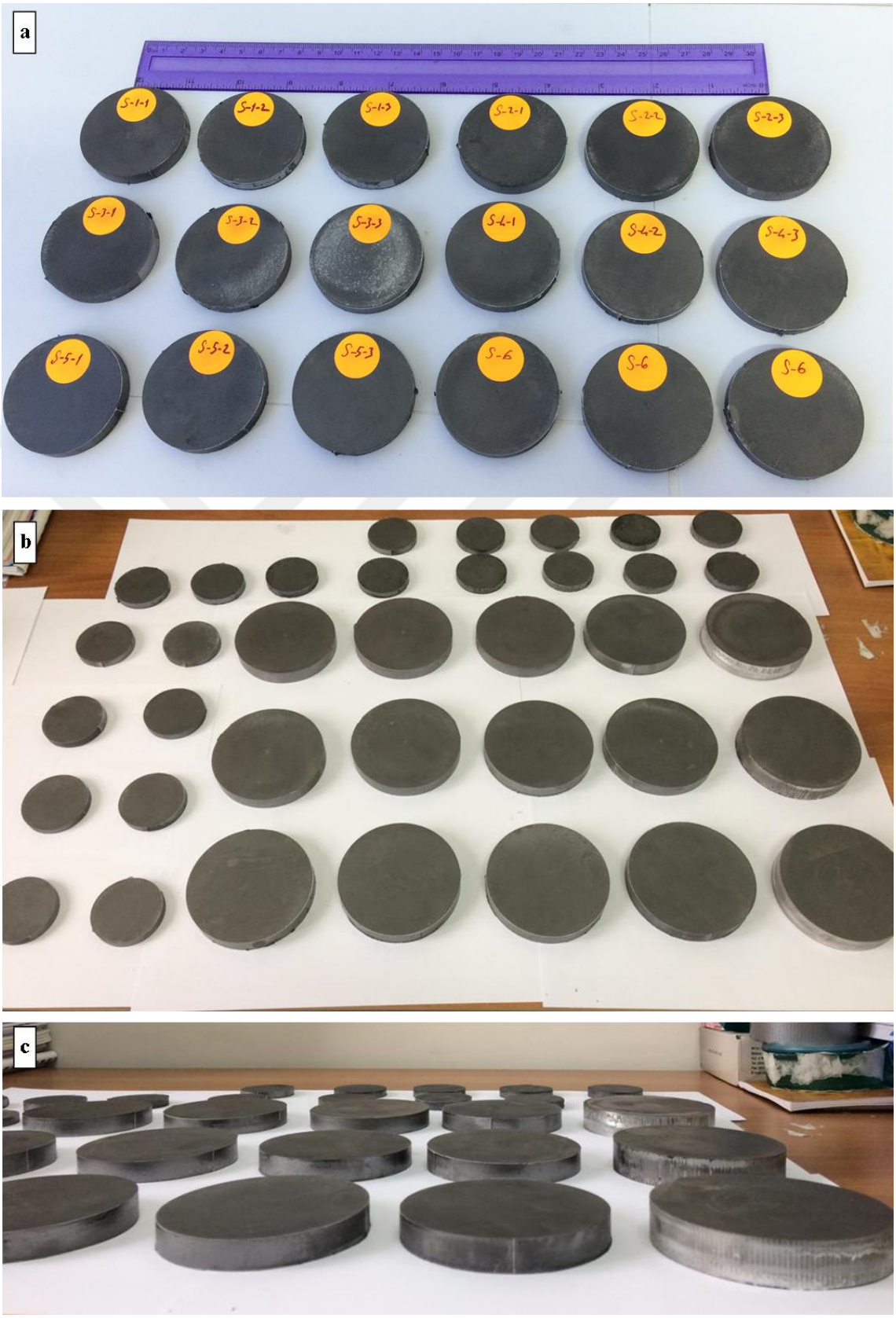
		% 5	% 10	% 15	% 20	% 30	% 40
SiC takviyeli (Düşük hız)	Al6061 (gr)	35,24	33,39	31,53	29,67	25,97	22,26
	SiC (gr)	2,205	4,410	6,616	8,81	13,23	17,59
B_4C takviyeli	Al6061(gr)	35,24	33,39	31,68			
	B_4C (gr)	1,73 g	3,46	5,19			
SiC takviyeli (Balistik)	Al6061 (gr)				178,6		
	SiC (gr)				52,9		



Şekil 2.8. Numune üretimi için kullanılan kalıplar.

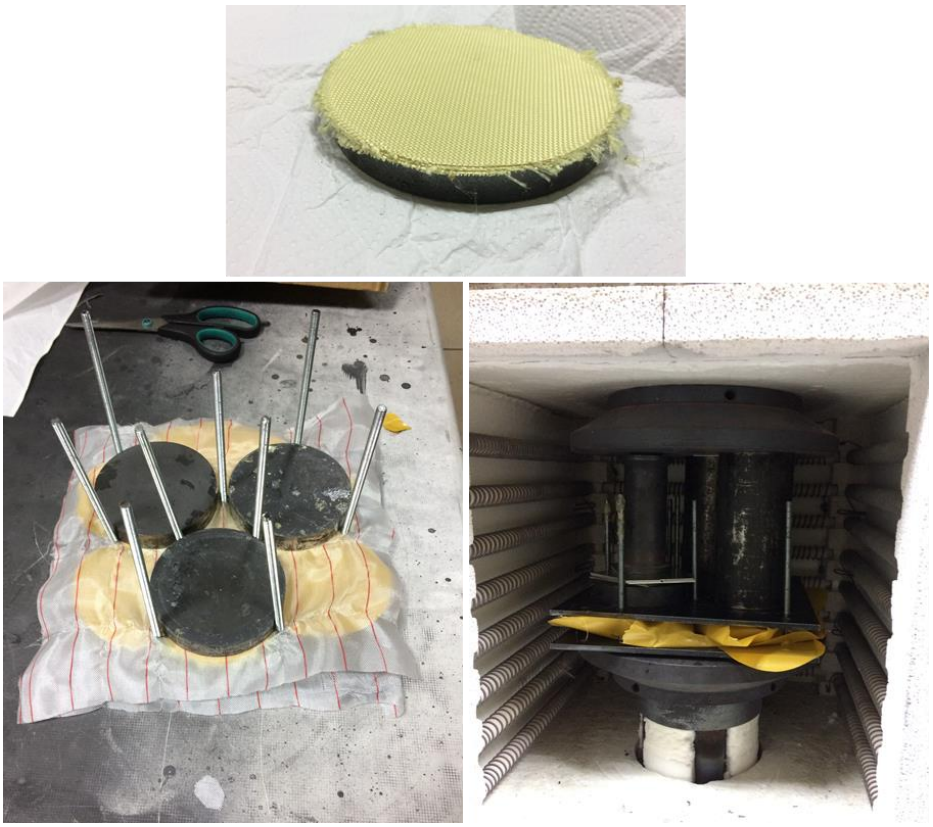


Şekil 2.9. Metal matrisli kompozit yüzey temizlemesi.



Şekil 2.10. Düşük hız ve balistik testler için üretilen MMK'lar.

Aramit takviyeli polimer matrisli kompozit üretimi için Kompozitsan® firmasından temin edilen prepregler kullanılmıştır. Aramit kumaş plain yapıda olup 300 gr/m^2 alansal yoğunluğa sahiptir. Prepreg kullanılmasındaki amaç istenilen boyutlarda numune kesiminin kürleşmeden önce sağlanmasının verdiği avantaj ve metal matrisli kompozitler ile polimer matrisli kompozitleri yapıştırmak için ekstradan bir yapıştırıcı tabakanın kullanılmasına ihtiyaç olmamasıdır. Prepregden kompozit elde etme işlemi bölüm 1.4.4'te detaylı bir şekilde anlatılmıştır. Bölüm laboratuvarı imkanları doğrultusunda prepregler metal matrisli kompozitlerin üretildiği sıcak pres cihazı yardımı ile üretilmiştir. İstenilen boyutlarda kesilen prepregler uygun şekilde yerleştirilip (Şekil 2.11) yaklaşık 10-15 bar basınç altında 120℃ sıcaklıkta 90 dakika boyunca vakum ortamında kürlenmiştir. Isıtma rampası 6 ℃/dak olarak ayarlanmıştır. Uygulanan basınç elde edilecek numune katman sayısına göre farklılık sergilemesi sebebi ile her bir katmanın ulaşacağı nihai kalınlık olan 0,25 mm kalınlığa göre 10-15 bar arasında basınç değiştirilmiştir. Prepreglerin oda sıcaklığındaki raf ömürleri yaklaşık olarak 7-10 gün dür. Bu sebeple prepreg kürleme işleminden önce metal matrisli kompozitlerin üretimi ve temizlenmesi işlemi öncelikli olarak yapılmıştır.



Şekil 2.11. Prepregten polimer matrisli kompozit üretim aşamaları.

Metal matrisli kompozitlerin modellemesi için gerekli olan yüksek hızlardaki gerilme şekil değiştirme verilerinin tespiti için tel erezyonla kesilen 6 mm çapında ve 6mm boyundaki numuneler (Şekil 2.12) Erciyes üniversitesi makine mühendisliği mekanik laboratuvarında bulunan Split Hopkinson basınçlı çubuk test cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 2.13).

Elde edilen metal matrisli ve polimer matrisli kompozitlerin yoğunluk ölçümleri Arşimet prensibi ile hesaplama yapan Precisa® marka cihaz ile yapılmıştır. Arşimet prensibi ile yapılan hesaplama detayı ve cihaz görüntüleri bölüm 3.1'de anlatılmıştır.

Ayrıca metal matrisli kompozitlerin sertlikleri ölçülmüş ve takviye oranına göre kıyaslanmıştır. Sertlik ölçümü ile ilgili detaylara bölüm 3.1'de ulaşılabilir.

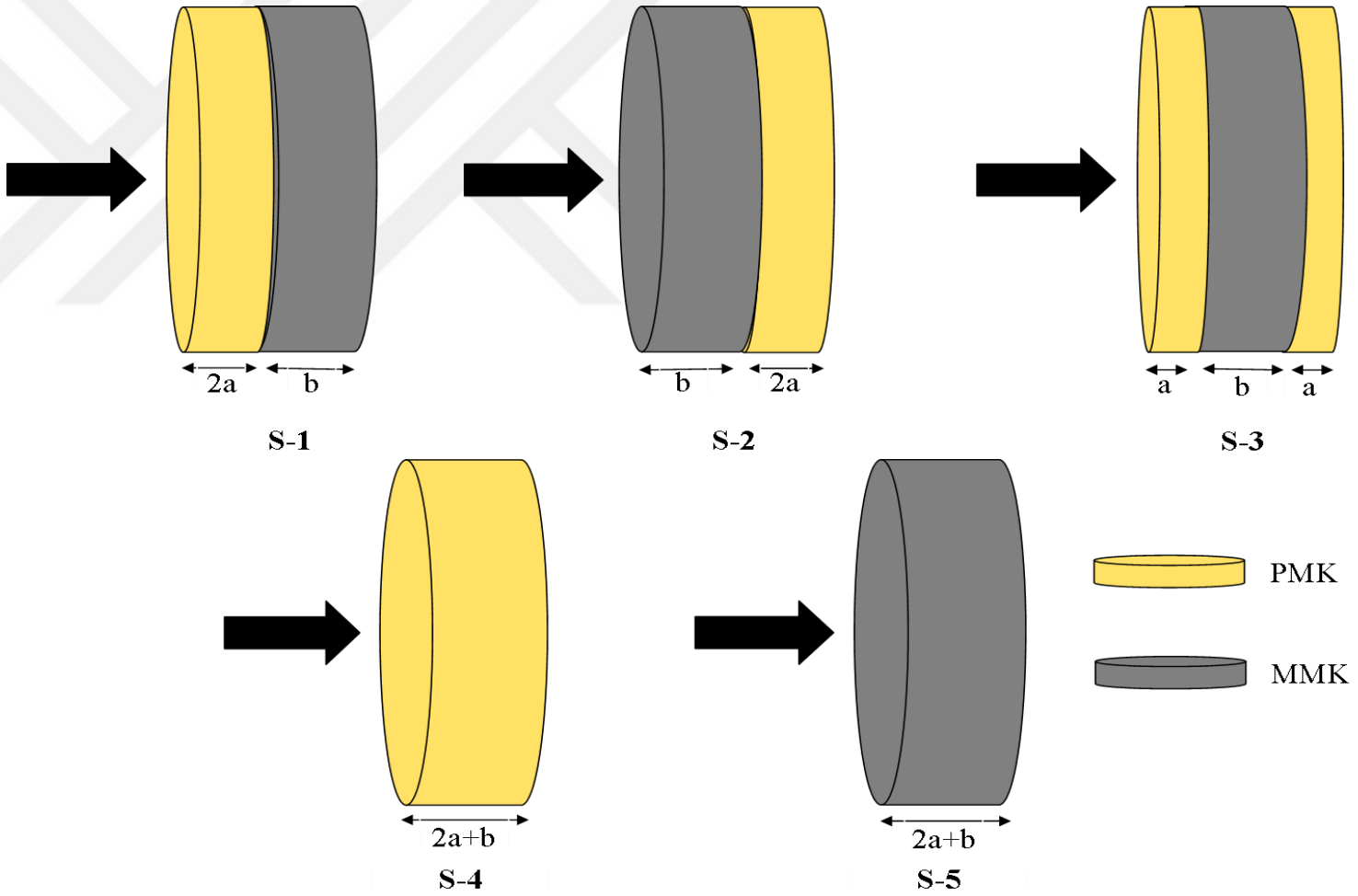


Şekil 2.12. Tel erozyon ile kesilmiş numune örneği.



Şekil 2.13. Split Hopkinson basınçlı çubuk test cihazı.

Şekil 2.14'de de görüldüğü üzere sandviç yapılar beş faklı konfigürasyonda tasarlanmıştır. Bunlardan birinci tipteki numune S-1 kodlu yapı, her biri 0.25 mm kalınığındaki 20 katman aramit prepreg ve 13 mm lik MMK den meydana gelmektedir. İkinci tip numune S-2 numaralı numunedir bu numune S-1 ile aynı yapıda olmakla birlikte hedefe ters yerleştirilmiştir. Yani mermi ilk olarak MMK ile karşılaşmaktadır. Üçüncü tip S-3 numunesi MMK ortada kalacak şekilde ön ve arka yüzeyi 10 ar katman prepreg ile kaplanmış toplamda 18 mm kalınlığındaki numunedir. Son olarak dördüncü ve beşinci tipteki numuneler diğer numuneler ile eş geometride olacak şekilde sırası ile saf PMK ve saf MMK'dan meydana gelmektedir. Yani bu numunelerde farklı katmanlar bulunmamaktadır, kıyaslama numuneleri olarak kullanılmışlardır.



Şekil 2.14. Sandviç yapıyı oluşturan numune tipleri.

2.2. Sayısal çalışma

SiC ve B_4C katkılı Al6061 matrisli kompozit malzemelerin düşük hızda darbe testlerinin nümerik çalışmaları için non-lineer sonlu elemanlar yöntemi kullanılmıştır. Analizler ABAQUS/Explicit® paket programı yardımı ile gerçekleştirilmiştir. Darbeye maruz bırakılmış numune deneysel numunemiz ile benzer olarak 50 mm çapında ve 7 mm yüksekliğinde silindirik geometride modellenmiştir. Sınır şartları düşük hızlı darbe cihazındakine benzer olması için numune iki kelepçe arasına sıkıştırılarak darbeye maruz bırakılmıştır. Tutucu kelepçeler ankastre olarak tutturulmuş ve araya sıkıştırılan kompozit numune her yönde serbest bırakılmıştır. Metal matrisli kompozit numuneler 8 düğümlü brick katı eleman (C3D8R) kullanılarak modellenirken 10 mm yarıçaplı yarı küresel vurucu uç 4 düğümlü R3D4 rijit kabuk eleman kullanılarak modellenmiştir. Vurucu ucun sadece düşey yönde hareket etmesi serbest bırakılmıştır diğer yönler kısıtlanmıştır. MMK ve vurucu uç arasında Abaqus/Explicit bünyesindeki GENERAL CONTACT ALGORITHM uygulanmıştır. Gerçeğe benzer bir partikül takviyeli metal matrisli kompozit malzeme elde etmek için takviye malzemesi, matris malzemesi içerisinde 100 mikronluk ayrıtları olan küpler şekilde dağıtılmıştır. Bu işlem Python® programlama dilinde hazırlanmış bir algoritma ile takviye elemanının hacim yüzdesine göre rastgele dağıtılarak gerçekleştirilmiştir. Her bir toz yaklaşık olarak bir kübik yapıya denk gelecek şekilde modelleme gerçekleştirilmiş böylece düşük hızda darbeye maruz bırakılan numunelerin her biri yaklaşık 13 milyon 750 bin elemandan meydana gelmektedir. Matris malzemesi olan Al6061 elastoplastik olarak modellenirken seramik takviye malzemeleri elastik malzeme olarak modellenmiştir. Bunun yanında hasar modeli olarak Johnson – Cook [93] ve Johnson – Holmquist [94] hasar parametreleri de kullanılmıştır. Her bir numune için analizler 64GB RAM ve 40 CPU özellikli Workstation da 72 saat sürmüştür. Al6061, SiC, B_4C ve balistik testlerde kullanılan mermi malzemesi olan AIS4340 çeliğinin bazı özellikleri Tablo. 4.'te verilmiştir.

Tablo 2.4. AL6061, SiC, B_4C ve AIS4340 çeliğinin bazı mekanik özellikleri.

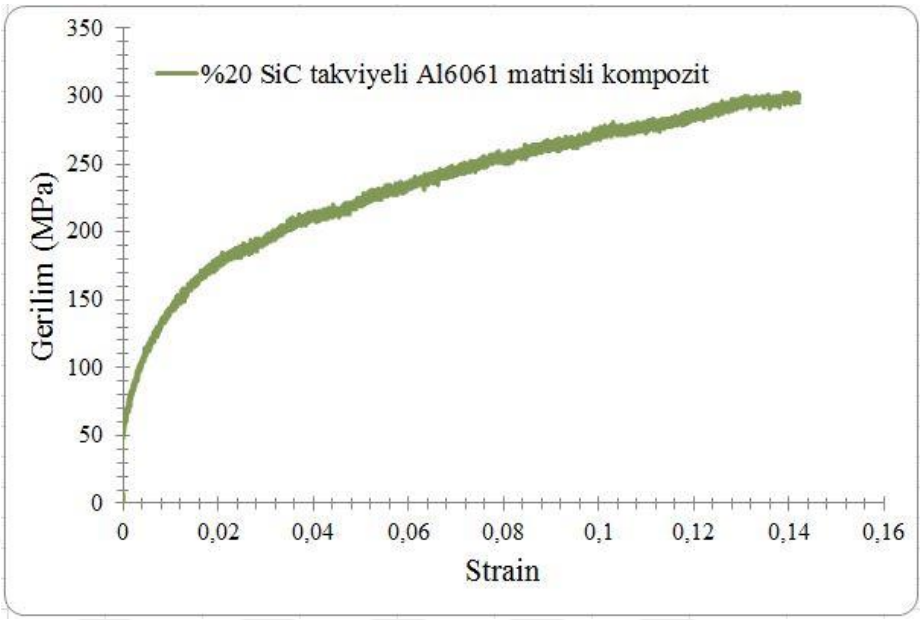
Malzeme	Al6061	SiC	B_4C	AIS4340 Çeliği
Yoğunluk(kg/m^3)	2700	3210	2510	7850
Poisson oranı	0,3	0,14	0,17	0,3
Elastisite Modülü (GPa)	70	400	462	210

Eleman sayısının oldukça fazla olması analizlerin yapılmasının zorlaştırmıştır. Sadece MMK yapıdan meydana gelen beşinci tip numune boyutlarının (90 mm çap ve 18mm yükseklik) düşük hızlı darbe numunelerinin boyutlarına (50 mm çap ve 7 mm yükseklik) göre oldukça büyük olması düşük hızlı darbe testlerinde yapılan modelleme işlemini beşinci tip numunelere uygulanmasını imkansız kılmaktadır. Bu sebeple beşinci tip numuneyi modellemek için %20 SiC katkılı MMK numunesine ait yüksek şekil değişim hızında da gerçekleştirilen Split Hopkinson testlerinden alınan gerilme strain verileri kullanılmıştır. Bu testler için %20 takviyeli MMK numune tel erezyon yardımı ile 6 mm çap ve 6 mm boyda olacak şekilde kesilmiş ve 12 m/s hız da test edilmiştir. Gerçekleşen strain rate 1500 dür. %20 SiC katkılı Al6061 numunesine ait Split Hopkinson testi sonucu elde edilen gerilme strain değerleri Şekil 2. 15 'te sunulmuştur.

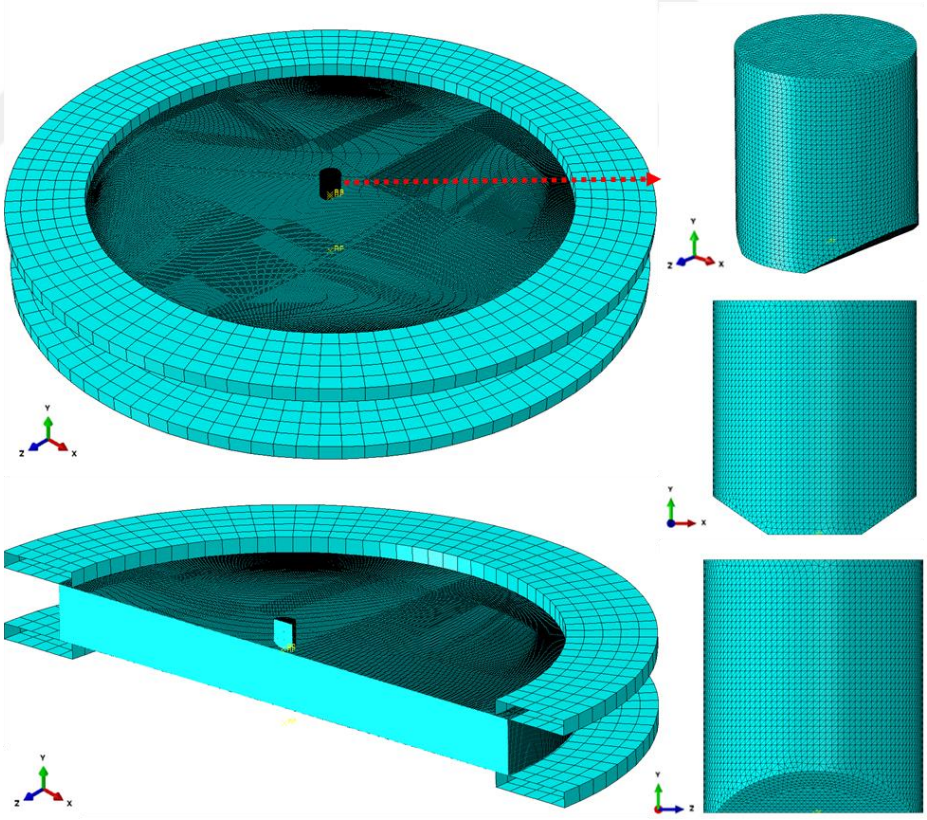
Beşinci tip numunelere uygulanan balistik testlerin nümerik çalışması Abaqus/Explicit paket programı yardımı ile gerçekleştirilmiştir. Mermi ve MMK elastoplastik olacak şekilde üç boyutlu katı sonlu elemanlar kullanılarak modellenmiştir. Daha önce de bahsedildiği gibi MMK'nın mekanik özellikleri Split Hopkinson testi sonucu alınmış ve kullanılmıştır. Mermi için gerekli AIS4340 çeliğine ait plastik bölgeyi tanımlayan mekanik değerler Banerjee'nin [95] gerçekleştirdiği çalışmadan alınmıştır.

Balistik testler de tıpkı düşük hızlı testlerin gerçekleştirildiği testler gibi hedef numunenin iki kelepçe arasına yerleştirilmesi sonucu gerçekleştirilmiştir. Modelin ve merminin meshlenmiş hali Şekil 2.16'da verilmiştir. Kelepçeler ankastre olacak şekilde hareketleri kısıtlanmış ve rijit olarak modellenmiştir. Hedef MMK numune her yöne serbest bırakılarak tutucular arasına sıkıştırılmıştır. Merminin düşey doğrultuda hareketi serbest bırakılmış diğer hareketler kısıtlanmıştır. Mermi ve hedef arasında Abaqus/Explicit bünyesindeki GENERAL CONTACT ALGORITHM uygulanmıştır. MMK numuneler ve mermi için sırasıyla, 8 düğümlü brick katı eleman (C3D8R) ve 4 düğümlü tetrehedral C3D4 elemanlar kullanılırken tutucular için R3D4 rijit kabuk eleman kullanılmıştır. Tutucu mermi ve numunenin eleman sayıları sırası ile 1201, 156603 ve 1121760 tır. 40 CPU 64 GB RAM özellikli workstation kullanılmıştır.

Gerek düşük hızlı testlerde gerekse de balistik testlerde vurucu/mermi hızları ağırlıkları vb. özelliklerin tamamı gerçekle bire bir aynı girilmiştir.



Şekil 2.15. Split hopkinson cihazından elde edilen gerilim strain eğrisi.



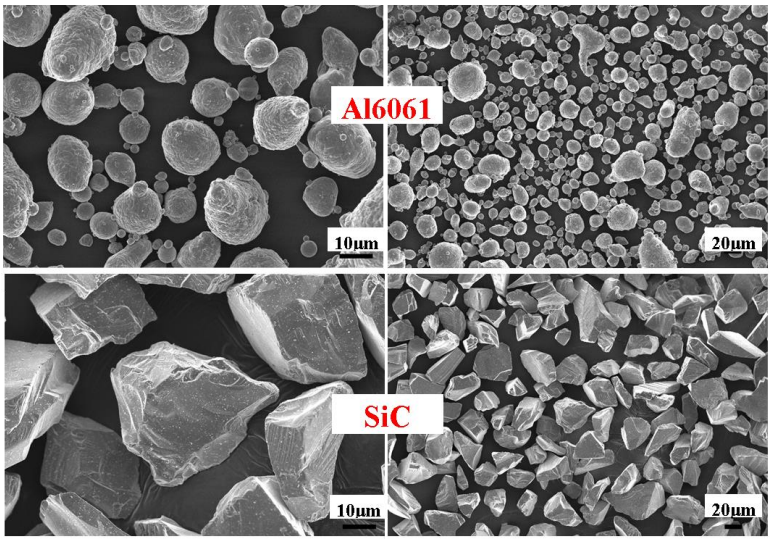
Şekil 2.16. Beşinci tip numune ve mermi modeli.

3. BÖLÜM

BULGULAR VE TARTIŞMA

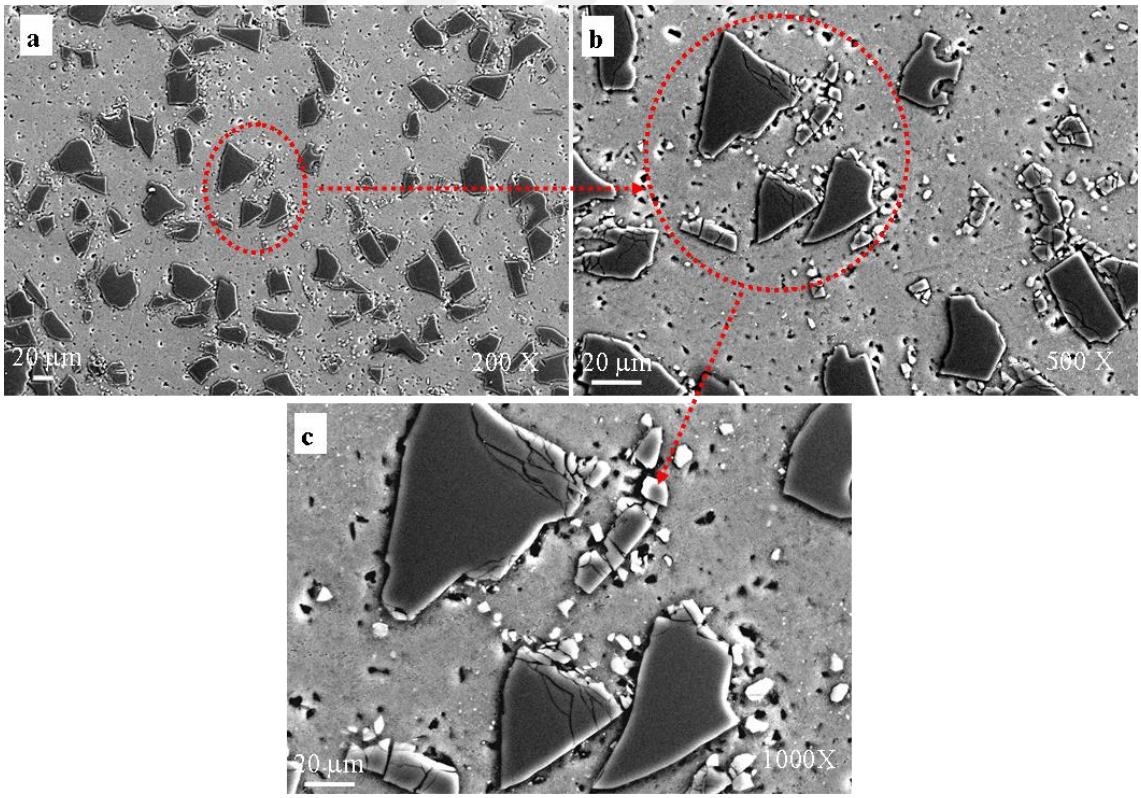
3.1. Mikroyapı, Sertlik ve Yoğunluk Analizleri

Metal matrisli kompozitleri üretmek için kullanılan tozların taramalı elektron mikroskobu görüntüleri Şekil 3.1'de verilmiştir. Tozların farklı boyutları verilen Şekil 3.1 dikkatli incelendiğinde Al6061 alaşımının küresel bir yapıda olduğu bunun yanında SiC tozlarının da keskin köşeli bir yapıda olduğu görülebilmektedir. Doğası gereği metal ve seramik tozlarının üretim yöntemi sebebi ile bu tür iki farklı geometride olması toz metalürjisi ile üretim yapılırken paketleme aşamasına negatif etki gösterir. Ancak, sıcak pres kullanılması sayesinde sıcak presin sıkıştırma ve sinterleme aşamalarının eş zamanlı olması bu negatif durumu tölere etmiş ve metal matrisli kompozitler sorunsuz bir şekilde üretilmiştir. Bunun yanında toz boyutlarının yakın seçilmesi üretimi kolaylaştıran etmenlerden biridir.



Şekil 3.1. MMK'ları üretmek için kullanılan tozların taramalı elektron mikroskobu görüntüleri.

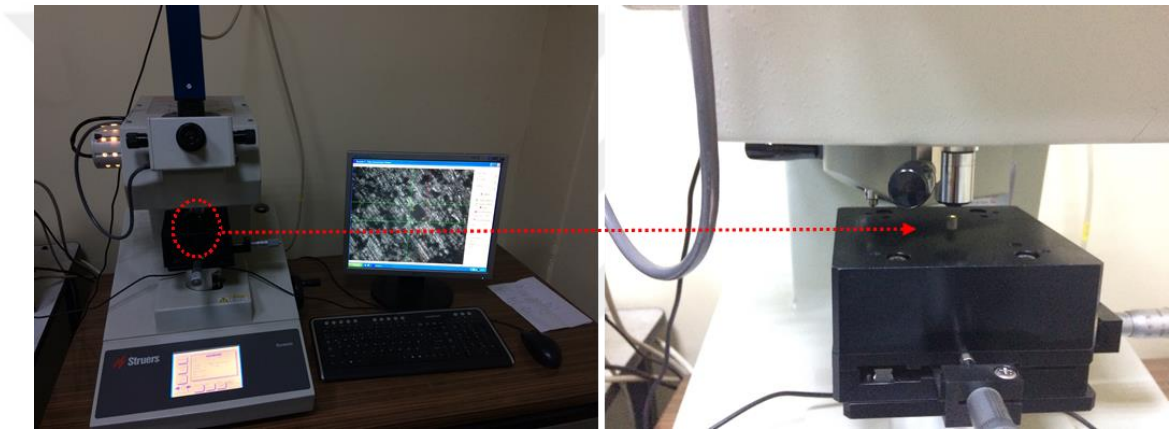
Hacimce %20 oranında SiC içeren Al6061 matrisli kompozitlerin üç farklı büyütme ile alınan taramalı elektron mikroskobu görüntüleri Şekil 3.2'de sunulmuştur. Şekil 3.2 incelendiğinde kompozit numunelerdeki takviye dağılımının homojene yakın olduğu görülmektedir. Takviye malzemesinin matris içerisinde bu denli iyi dağılmasının sebebi matris ve takviye tozlarının üretim öncesi karıştırıcı ve çalkalayıcı cihaz ile 3 saat karıştırılması olduğu bunun yanında tozlarda herhangi bir nem ve bundan kaynaklanabilecek topaklanmanın olmamasına dayandırılabilir. Şekil 3.2 üzerinde işaretli yerler incelendiğinde numune taramalı elektron mikroskobu çekimleri için hazırlanırken uygulanan yüzey temizleme ve parlatma işleminden kaynaklandığı düşünülen SiC tanelerinin kırıldığı görülmektedir. Bu tozlarda meydana gelen kırılmaların toz uçlarından başlıyor olması bu kırılma sebebinin yüzey temizleme ve parlatma esasında meydana geldiğinin kanıtlamaktadır.



Şekil 3.2. Hacimce %20 oranında SiC takviyeli Al6061 matrisli kompozitlerin farklı büyütmelerdeki taramalı elektron mikroskobu görüntüleri.

Metal matrisli numunelerin sertliğinde meydana gelen değişikliğin tespiti için hacimce %20 oranında SiC içeren Al6061 matrisli kompozitin ve takviyesiz üretilmiş Al6061 numunesinin sertlikleri ölçülmüştür. Kullanılan Vickers sertlik cihazı Şekil 3.3'te

görülebilmektedir. Tel erozyonla kesilen numuneler yüzeyleri temizlendikten sonra sertlik ölçme işlemine tabi tutulmuştur. Bunun için 136° lik piramit uç kullanılmıştır. Bu yöntemde belirli bir sürede belirli bir yük uygulanır ve uygulanan kuvvetin numune yüzeyinde meydana gelen dikdörtgen alana oranı ile bir setlik değeri elde edilir. Testlerde 19,616 N yük 10 s süre ile uygulanmış ve Şekil 3.1'de de görüldüğü üzere meydana gelen alan sertlik cihazına tanıtılarak sertlik değerleri elde edilmiştir. Her numuneden 5'er ölçüm alınmış sonuçlar Tablo 3.1'de sunulmuştur. Buna göre elde edilen ölçümlerin ortalamaları alındığında %20 takviyeli numunenin takviyesiz numuneye göre sertlik değeri %48,6 artmıştır.



Şekil 3.3. Vickers sertlik ölçümü.

Tablo 3.1. Metal matrisli kompozitlerin sertlik değerleri.

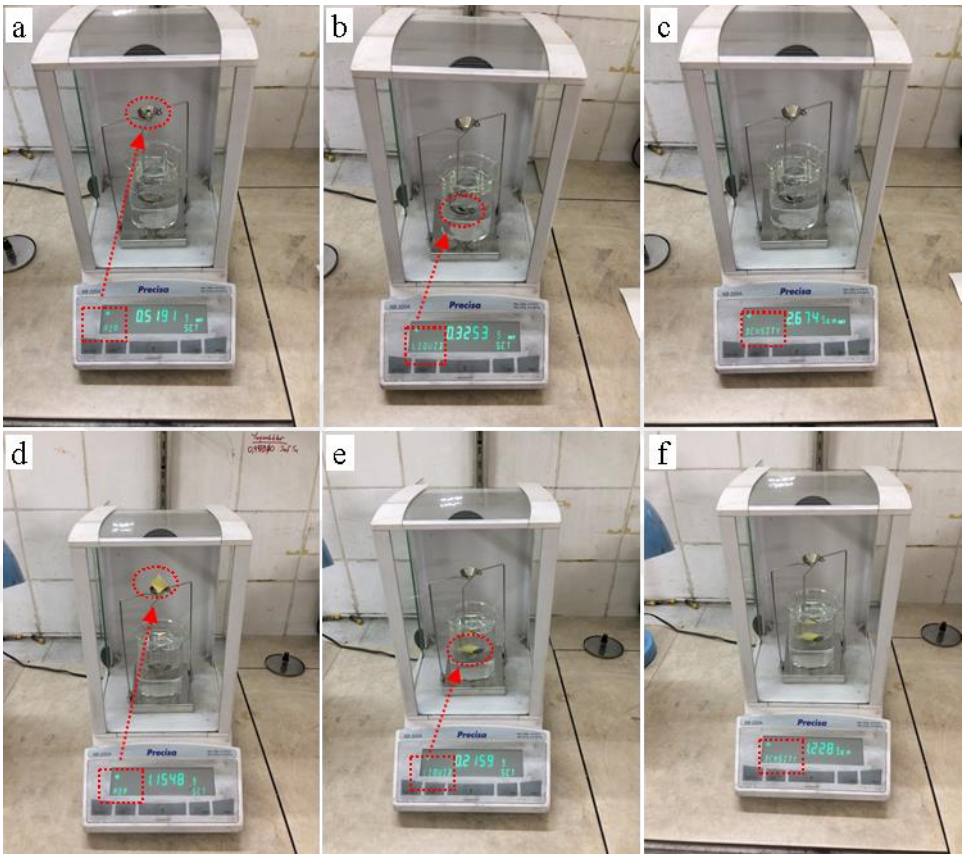
(HV)	1.Ölçüm	2. Ölçüm	3. Ölçüm	4. Ölçüm	5. Ölçüm	Ortalama
Al6061	40,1	42,2	43,1	42,8	44,0	42,4
SiC/Al6061 (%20)	61,9	68,7	62,2	61,5	60,5	63,0

Sandviç yapılarda kullanılan metal matrisli ve polimer matrisli kompozitlerin yoğunlukları Şekil 3.4'te görüleceği üzere deneysel olarak Arşimet prensibi ile ölçülmüştür. Bu yöntem yoğunluğu ölçülecek numunenin havada ve suda tartılması esasına dayanmakta ve aşağıdaki formül ile hesaplanmaktadır.

$$\rho k = \frac{wh}{wh - ws}\rho s \quad (1)$$

Burada ρk kompozitin yoğunluğunu wh kompozitin havadaki ağırlığını ws kompozitin sudaki ağırlığını son olarak ρs'de suyun yoğunluğunu (1000kg/m^3) ifade etmektedir. Şekil 3.4 a ve b'de metal matrisli kompozitin ağırlığı sırası ile havada ve suda ölçülmüş

c de ise yoğunluğu okunmuştur. Aynı şekilde d ve e'de polimer matrisli numunenin sırası ile havada ve suda ki ağırlıkları tartılmış ve f'de ise yoğunluğu okunmuştur. Her bir numuneden üçer ölçüm alınmış ve sonuçlar Tablo 3.2'de sunulmuştur buna göre metal matrisli kompozit saf Al6061 ve polimer matrisli numunelerin deneysel yoğunlukları 2.779, 2.666 ve 1.255 gr/cm^3 tür.



Şekil 3.4. MMK ve PMK yoğunluk ölçümleri.

Tablo 3.2. Numunelerin deneysel yoğunluk değerleri.

(gr/cm^3)	1.Ölçüm	2.Ölçüm	3.Ölçüm	Ortalama
PMK	1,228	1,224	1,312	1,255
Al6061	2,659	2,674	2,665	2,666
SiC/Al6061 (20)	2,758	2,781	2,799	2,779

Tablo 3.3. Numunelerin deneysel ve teorik yoğunluk değerleri ve porozite oranları.

(gr/cm^3)	Teorik yoğunluk	Deneysel yoğunluk	Porozite oranı (%)
Al6061	2,70	2,66	1,48
SiC/Al6061 (%20)	2,80	2,78	0,71

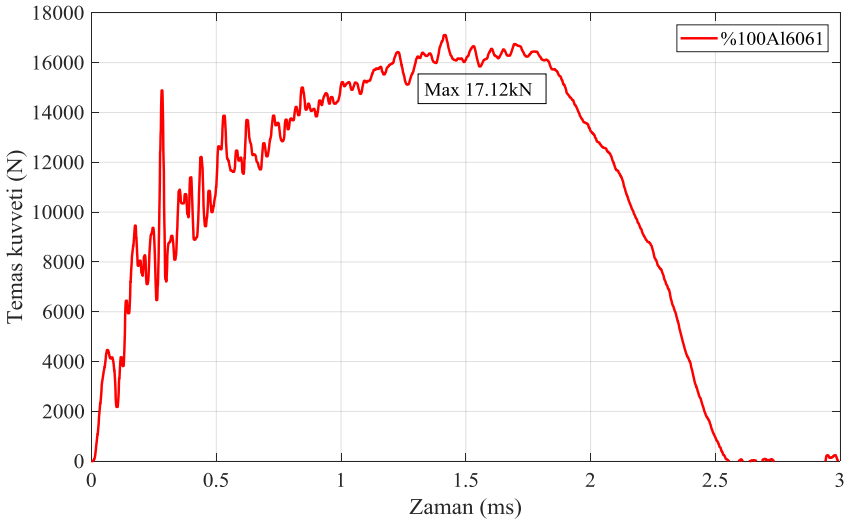
Elde edilen numunelerin teorik yoğunlukları hesaplanıp Tablo 3.3'te sunulmuştur. Yaptığımız deneysel yoğunluk ölçüm sonuçları teorikler ile karşılaştırıldığında oldukça yakın olduğu görülmektedir. Numunelerin deneysel yoğunluklarının teorik yoğunluklara oranı numunelerin doluluk oranını vermektedir. Bu değerin 1 den çıkarılıp 100 ile çarpılması sonucu numunelerin porozite miktarının yüzdesi hali elde edilmiş olur. Numunelerimizin porozite oranları Tablo 3.3'te sunulmuştur. Buna göre takviye içermeyen Al6061 in porozitesi %1,48 iken %20 oranında güçlendirilmiş numunelerimizin porozite oranları %0,71 olarak tespit edilmiştir.

3.2 Metal Matrisli Kompozitler ve Polimer Matrisli Kompozitlerin Darbe Testleri

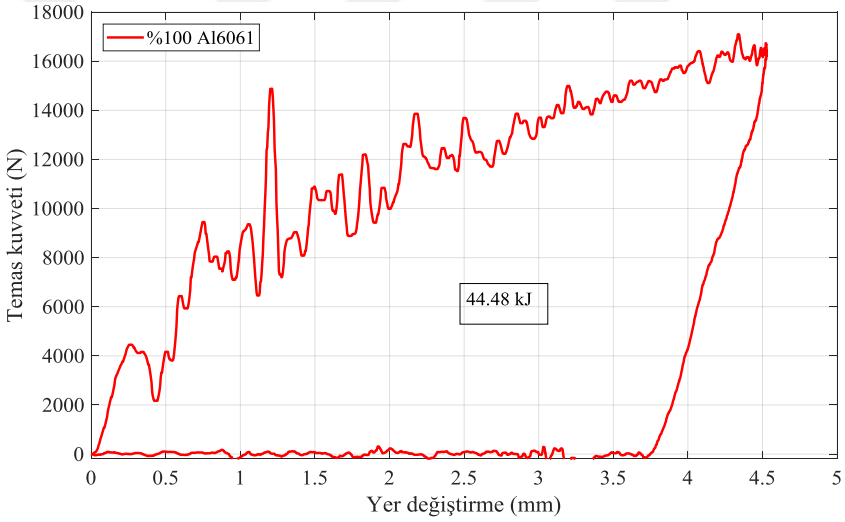
3.2.1. Metal Matrisli Kompozitlerin Düşük Hızlı Darbe Testleri

Sandviç yapılarda kullanılmak üzere metal matrisli kompozitlerin takviye malzemesi türü ve takviye oranına karar vermek için bir takım ön deneyler yapılmıştır. Bunun için takviye malzemesi olarak SiC ve B_4C kullanılmıştır. İlk olarak kıyaslama numunesi olan Saf Al6061'in yanında % 5, 10, 15 oranında takviye elamanı SiC ve B_4C'nin kullanıldığı kompozit numuneler üretilip düşük hızda darbe testleri gerçekleştirilmiştir. Tüm üretimler bölüm iki de anlatıldığı gibi aynı şartlarda gerçekleştirilmiştir. Elde edilen 5 mm çaplı 7 mm yüksekliğindeki numunelere 10 mm yarıçapındaki yarı küresel uç ile 4,45 m/s hız ve buna bağlı olarak 50 J enerji uygulanmıştır. Testlerden elde edilen temas kuvveti – zaman, temas kuvveti – yer değiştirme ve enerji – zaman eğrileri Şekil 3.5 ile Şekil 3.26 aralığında sunulmuştur.

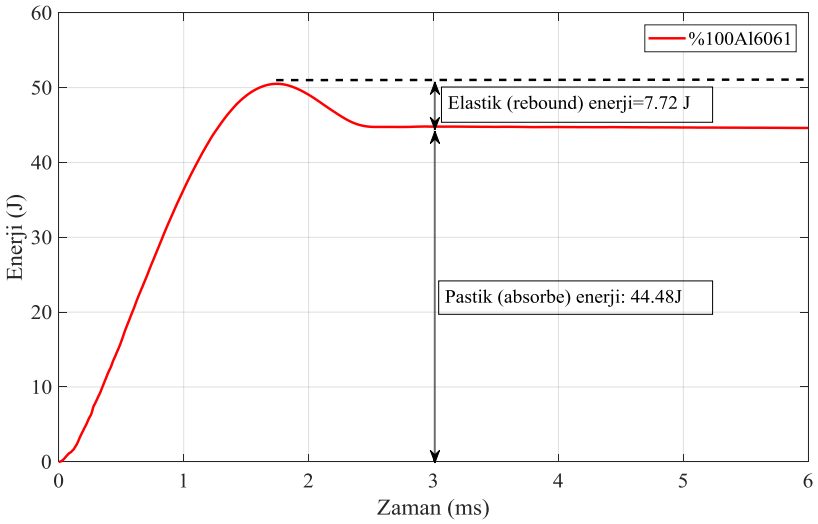
Kıyaslama amacı ile üretilmiş takviyesiz numunelere ait temas kuvveti – zaman, temas kuvveti – yer değiştirme ve enerji – zaman eğrileri Şekil 3.5, Şekil 3.6 ve Şekil 3.7'de sunulmuştur. Temas kuvveti – zaman eğrisi dikkate alındığında takviyesiz numuneye uygulanan darbe testi sonucu maksimum temas kuvvetinin 17,12 kN olduğu görülebilmektedir. Ayrıca, temas süresinin de 2,55 milisaniye (ms) olduğu anlaşılmaktadır. Temas kuvveti – yer değiştirme eğrisi ve enerji zaman grafiği göz önüne alındığında takviyesiz numunenin 44,48 J enerji absorbe ettiği anlaşılmaktadır. Numune delinmediği için temas kuvveti – yer değiştirme eğrisi kapalı haldedir (Şekil 3.6). Yer değiştirme miktarı 3,71mm dir.



Şekil 3.5. Al6061 numunesine ait temas kuvveti - zaman eğrisi.

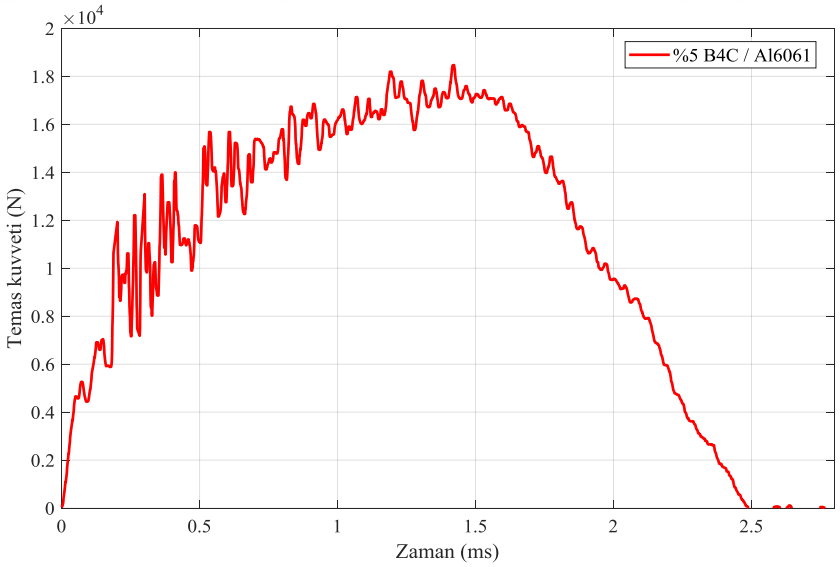


Şekil 3.6. Al6061 numunesine ait temas kuvveti - yer değiştirme eğrisi.

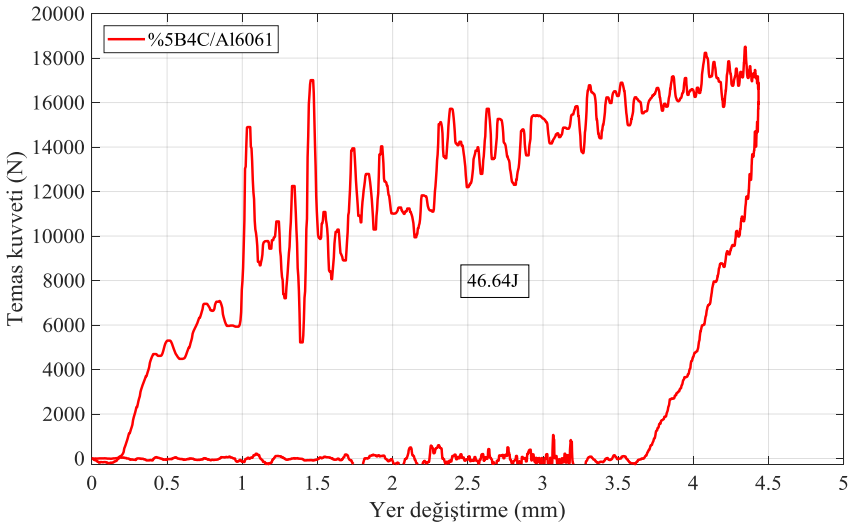


Şekil 3.7. Al6061 numunesine ait enerji - zaman eğrisi.

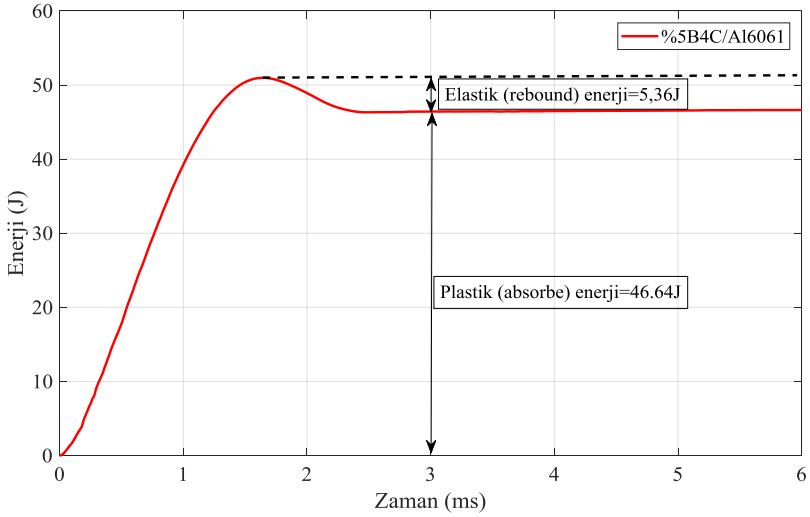
%5 B_4C takviyeli numunenin temas kuvveti – zaman diyagramı şekil 3. 8'de verilmiştir. %5 B_4C takviyeli numunenin temas kuvveti – zaman eğrisi incelendiğinde maksimum temas kuvvetinin 18,25 kN ve temas süresinin 2.5 ms olduğu tespit edilmiştir. Bunun yanında yer değiştirme miktarının 3,62 mm olduğu Şekil 3.9'de görülmektedir. Ayrıca, bilindiği üzere kuvvet yer değiştirme eğrisi altında kalan alan absorbe edilen enerjiyi vermektedir. Bu sebeple, kuvvet – yer değiştirme eğrisi altında kalan alan matlab programı yardımı ile hesaplanmış ve absorbe ettiği enerjinin 46,64J olduğu tespit edilmiştir. Şekil 3. 10'da verilen %5 B_4C takviyeli numuneye ait enerji – zaman eğrisi bu durumu ayrıca doğrulamaktadır.



Şekil 3.8. %5 B_4C/Al6061 numunesine ait temas kuvveti - zaman eğrisi.

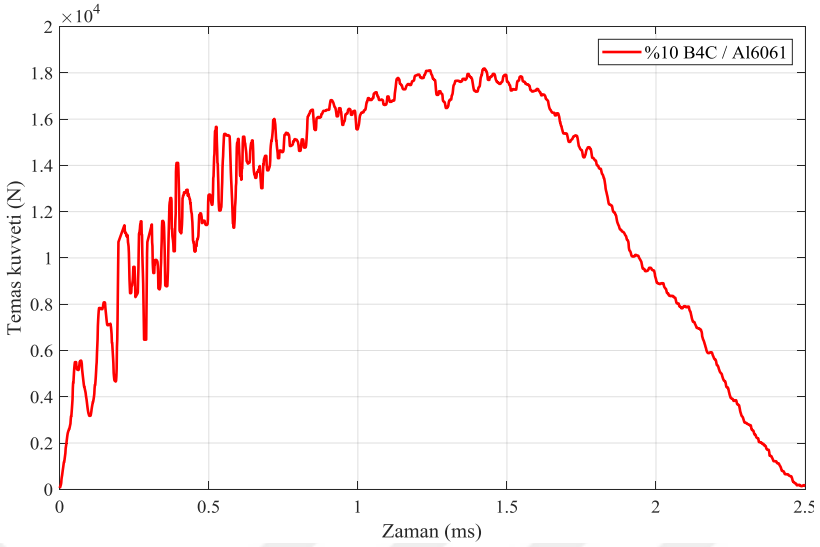


Şekil 3.9. %5 B_4C/Al6061 numunesine ait temas kuvveti - yer değiştirme eğrisi.

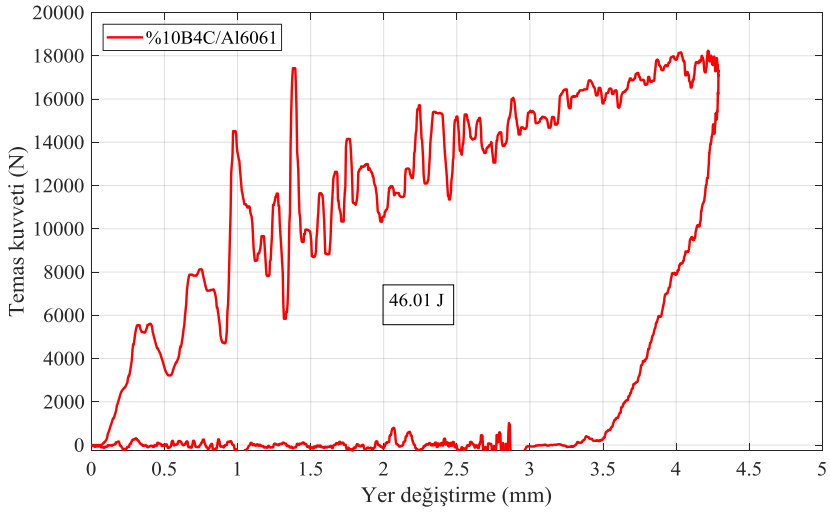


Şekil 3.10. %5 B_4C/Al6061 numunesine ait enerji - zaman eğrisi.

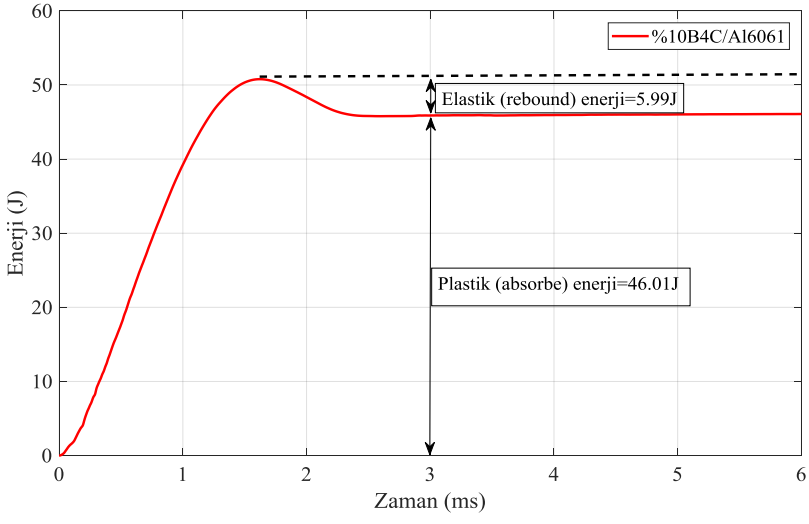
%10 ve 15 oranında B_4C takviyesi içeren numunelerin temas kuvveti – zaman eğrileri (Şekil 3.11, Şekil 3.14) incelendiğinde maksimum temas kuvvetinin sırası ile 18,1 ve 19 kN olduğu anlaşılmakta bunun yanından temas süreleri de sırası ile 2,51ve 2,53 ms olduğu görülmektedir. Temas kuvveti – yer değiştirme eğriler (Şekil 3.12, Şekil 3.15) ve enerji – zaman eğrilerinden (Şekil 3.13, Şekil 3.16) sırası ile 46,01 ve 47,29 J enerji absorbe ettikleri görülebilmektedir. Ek olarak, darbe esnasında numune üzerinde meydana gelen yer değiştirme miktarının da %10 ve 15 oranında B_4C takviye içeren kompozitler için sırası ile 2,99 ve 2,73 mm olduğu görülmektedir (Şekil 3.12, Şekil 3.15). Görüldüğü üzere takviye oranının maksimum temas kuvveti, temas süresi, yer değiştirme miktarı, dolayısı ile absorbe edilen enerji üzerinde etkisi mevcuttur. Ancak takviye miktarlarının düşük olması farkın dikkate değer olmasının önüne geçmiştir. Bu durum sandviç yapılarda kullanılacak metal matrisli kompozitlerin takviye oranına karar verilirken göz önünde tutulmuştur. %5, 10, 15 B_4C takviyeli kompozitlerin hiç birinde delinme meydana gelmemiştir. Ayrıca, bu durum bu kompozitlere ait temas kuvveti – yer değiştirme eğrileri incelendiğinde üçünün de kapalı olduğu dolayısı ile numunelerde bir delinme gerçekleşmediği sonucu ile de ortaya konulmuştur.



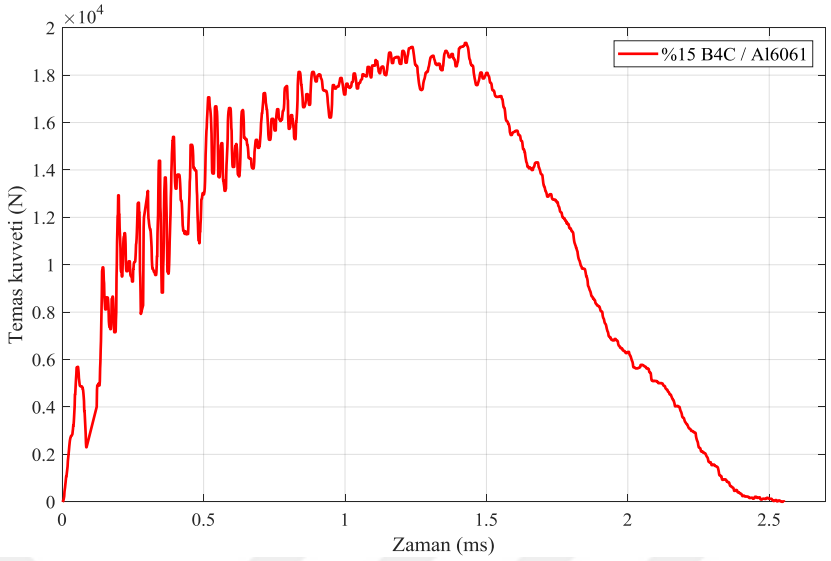
Şekil 3.11. %10 B_4C/Al6061 numunesine ait temas kuvveti- zaman eğrisi.



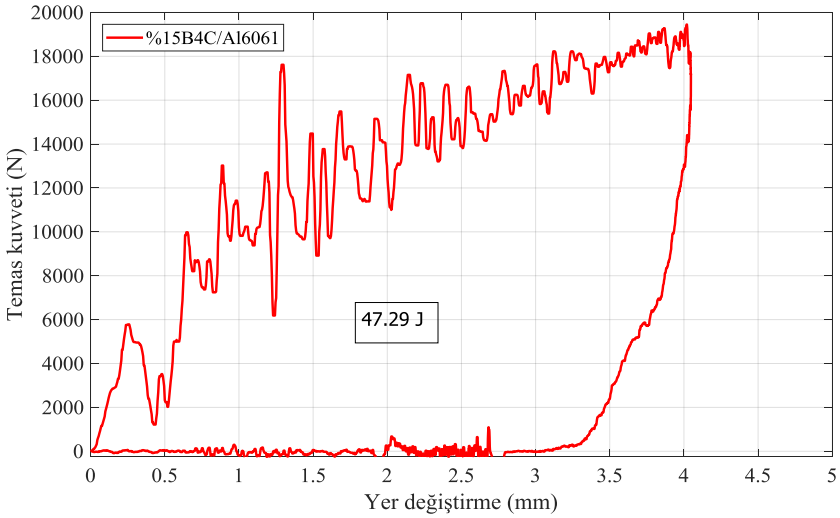
Şekil 3.12. %10 B_4C/Al6061 numunesine ait temas kuvveti – yer değiştirme eğrisi.



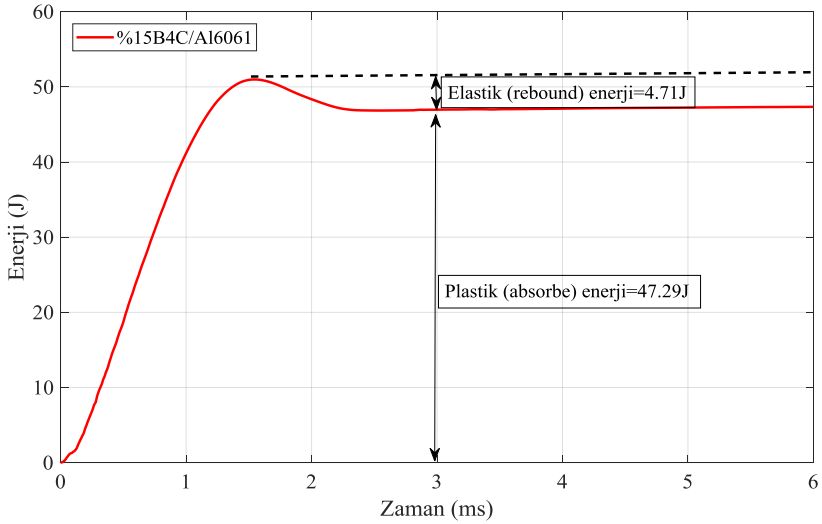
Şekil 3.13. %10 B_4C/Al6061 numunesine ait enerji - zaman eğrisi.



Şekil 3.14. %15 B_4C/Al6061 numunesine ait temas kuvveti - zaman eğrisi.



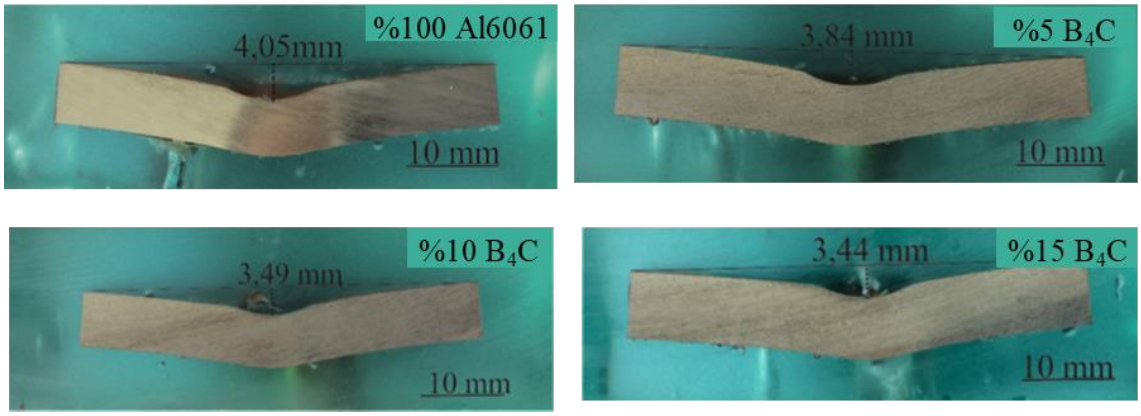
Şekil 3.15. %15 B_4C/Al6061 numunesine ait temas kuvveti - yer değiştirme eğrisi.



Şekil 3.16. %15 B_4C/Al6061 numunesine ait temas enerji - zaman eğrisi.

B_4C takviyeli kompozit malzemelerin enerji – zaman ve temas kuvveti – yer değiştirme eğrileri incelendiğinde kompozit malzemelerin absorbe ettikleri enerjiler anlaşılabilmektedir. Burada temas kuvveti – zaman eğrisi altındaki alan matlab programı ile hesaplanıp absorbe ettiği enerji hesaplanmıştır. Ayrıca, enerji – zaman eğrilerin de darbe cihazındaki vurucunun sahip olduğu enerjinin test başlangıcı ve bitişi arasındaki farkın kompozit numunenin absorbe ettiği enerjiyi verdiği bilinmektedir. Buna göre B_4C takviyeli kompozitlerde takviye oranı arttıkça kompozitlerin enerji absorbe edebilme yeteneklerinin de arttığı genellikle gözlemlenebilmektedir. Ancak, bu artışın dikkate değer oranda olduğu söylenemez bu durum takviye oranının düşük ve birbirlerine yakın olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

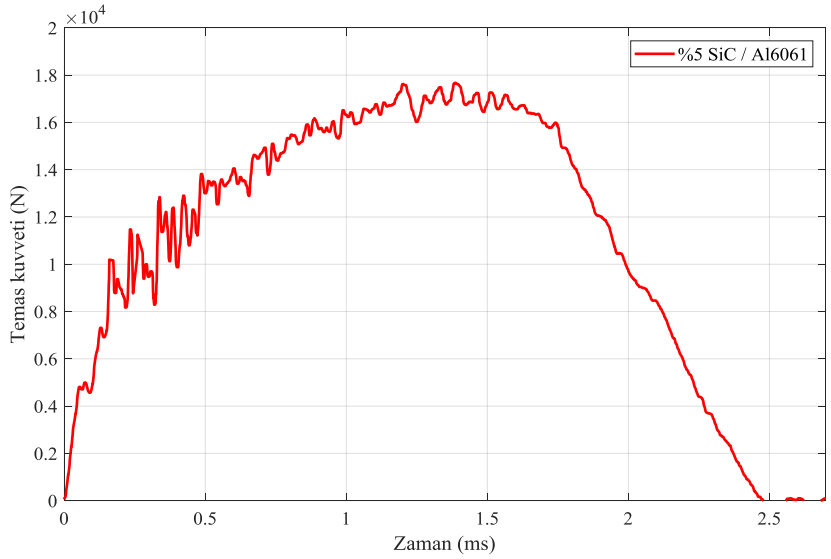
Bunun yanısıra, Şekil 3.17'de numunelerin darbe alan bölgelerininden kesilip darbe sonrası oluşan derinlikler ölçülmüştür. Takviye elemanı içermeyen numunede oluşan derinlik 4,05 mm iken %5, 10, 15 takviyeli numuneler için sırası ile 3.84, 3.49 ve 3.44 mm olarak kaydedilmiştir. Buna göre takviye oranı arttıkça derinlikte bir azalma meydana geldiği görülmektedir. Bu durum, takviye oranı arttıkça numunenin daha rijit bir davranış sergilediğini göstermektedir. İlave olarak, numunenin sünekliğinin takviye oranının artması ile düştüğü de gözlemlenmektedir.



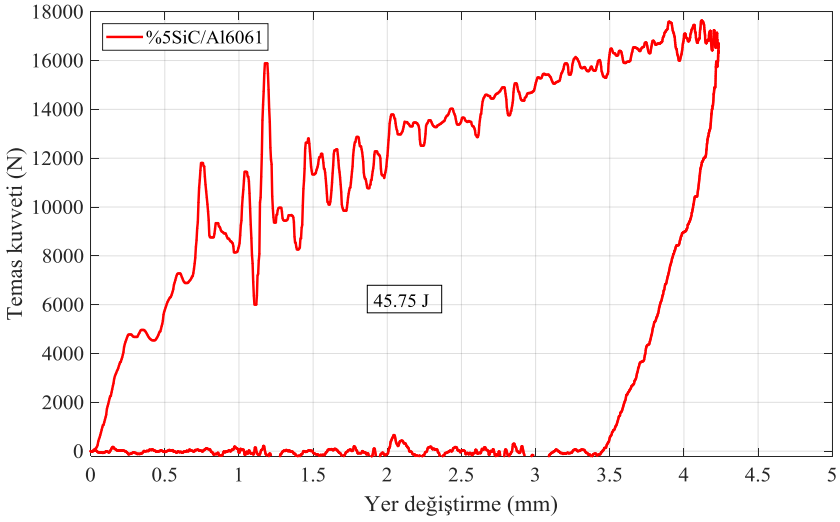
Şekil 3.17. B_4C/Al6061 numunelerine ait plastik deformasyon görüntüleri.

Bir diğer takviye elemanı olan SiC kullanılarak hazırlanmış ve aynı şartlar altında test edilmiş kompozit numunelerin temas kuvveti- zaman, temas kuvveti – yer değiştirme ve enerji zaman eğrileri %5, 10, 15 oranında takviye için sırasıyla Şekil 3.18, Şekil 3.19 ve şekil3.20'de sunulmuştur. Genel olarak B_4C ile takviye oranına bağlı olarak benzer davranış sergilediği görülmektedir. %5 oranında takviyeli kompozit numunenin

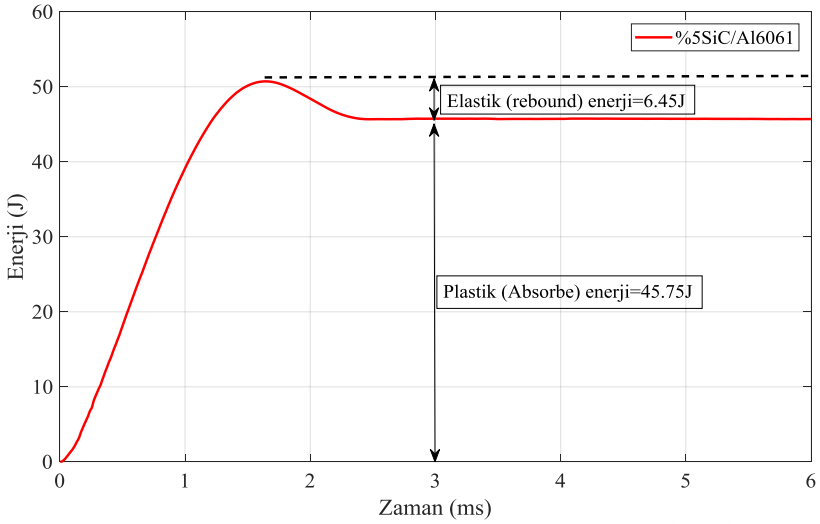
maksimum temas kuvveti ve temas süresi sırası ile 17,79kN, 2,49 ms olarak tespit edilmiştir. Bunun yanında enerji zaman eğrisi (Şekil 3.20) incelendiğinde % 5 oranındaki kompozit numunenin 45,75J enerjiyi absorbe ederek plastik şekil değişimine harcadığı ve 6,45 J enerjiyi de elastik enerjiye dönüştürüp tekrar burucu uç üzerine aktardığı görülmektedir. Söz konusu numune için yer değiştirme miktarı grafik üzerinden 3,45 mm olarak okunmaktadır. %10 ve 15 oranında takviye içeren kompozitlerdeki maksimum temas kuvvetleri ve süreleri sırası ile 17,8 kN, 17,2 kN, 2,51ms, 2,5 ms absorbe ettikleri enerji miktarları da sırası ile 47,02 J ve 46,43 J dür.



Şekil 3.18. %5 SiC/Al6061 numunesine ait temas kuvveti - zaman eğrisi.

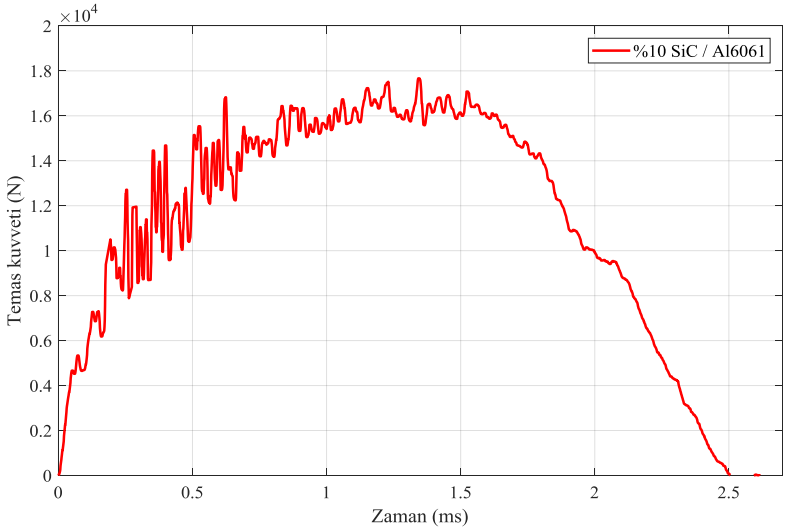


Şekil 3.19. %5 SiC/Al6061 numunesine ait temas kuvveti – yer değiştirme eğrisi.

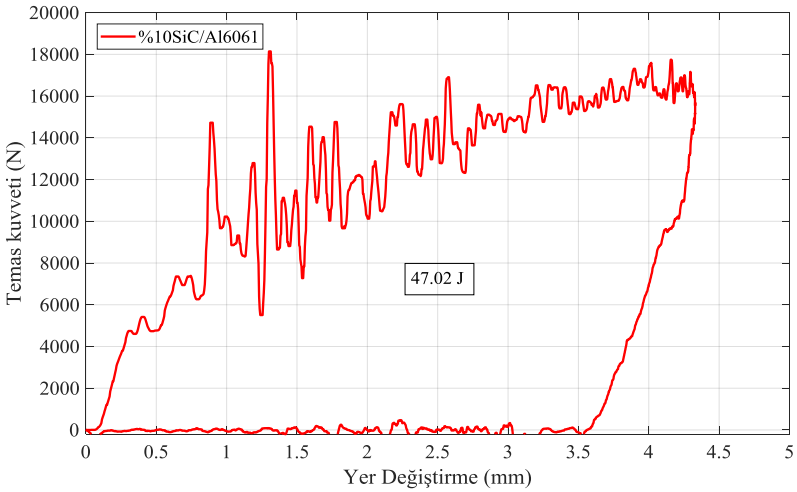


Şekil 3.20. %5 SiC/Al6061 numunesine ait enerji - zaman eğrisi.

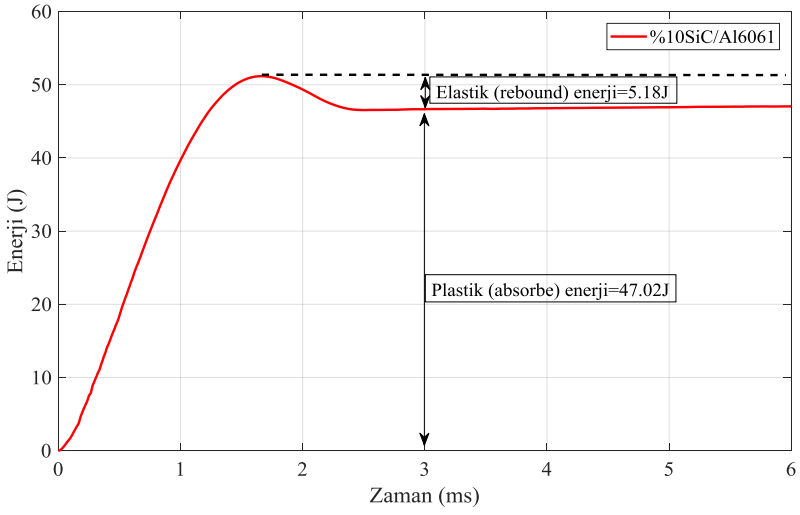
%10 SiC takviyeli kompozit malzemelerin temas kuvveti– zaman, temas kuvveti yer – değiştirme, enerji – zaman eğrileri ve darbe sonrası oluşan derinlik miktarları sırası ile Şekil 3.21, Şekil 3.22, Şekil 3.23 ve Şekil 3.27'de verilmiştir. Bu grafikler incelendiğinde kompozit malzemelerin maksimum temas kuvvetleri, yer değiştirme miktarları, temas süreleri ve absorbe ettikleri enerjiler görülebilmektedir. Buna göre SiC takviyeli kompozitlerde takviye oranı % 5'ten % 10'a arttırıldığında kompozitlerin enerji absorbe edebilme yeteneklerinin de arttığı gözlemlenebilmektedir. Bunun yanında %15 SiC takviyeli kompozit malzemelerin temas kuvveti– zaman, temas kuvveti yer – değiştirme, enerji – zaman eğrileri sırası ile Şekil 3.24, Şekil 3.25 ve Şekil 3.26'da verilmiştir. Bu eğriler incelendiğinde %15 ile %10 arasında çok küçük bir fark olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca, Şekil 3.27 numunelerin darbe sonrası darbe alan bölgelerininden kesilip darbe sonrası oluşan derinlikler ölçülmüştür. Buna göre takviye oranı arttıkça derinlikte bir azalma meydana gelmekte ancak bu azalmanın çok yüksek değerlerde olmadığı görülmetedir. Bu duruma takviye oranının düşük miktarda olması sebebiyle homojen sonuç gösterilemediğinin sebep olduğu düşünülmektedir.



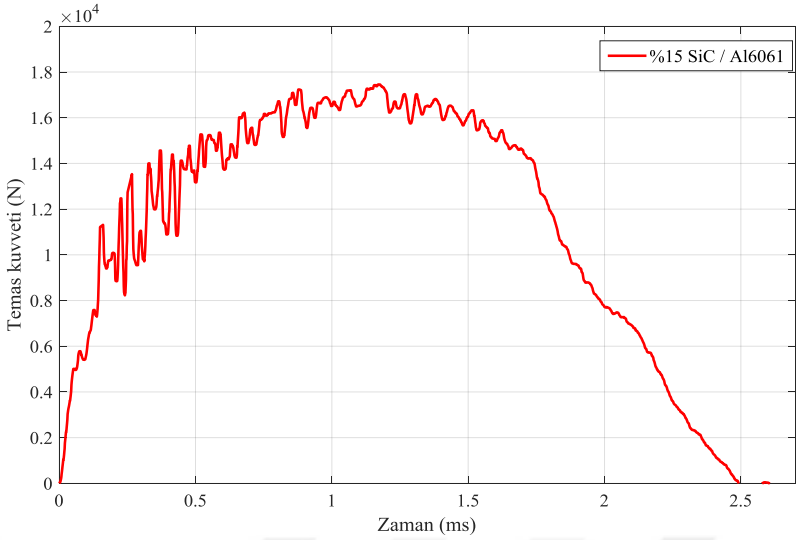
Şekil 3.21. %10 SiC/Al6061 numunesine ait temas kuvveti - zaman eğrisi.



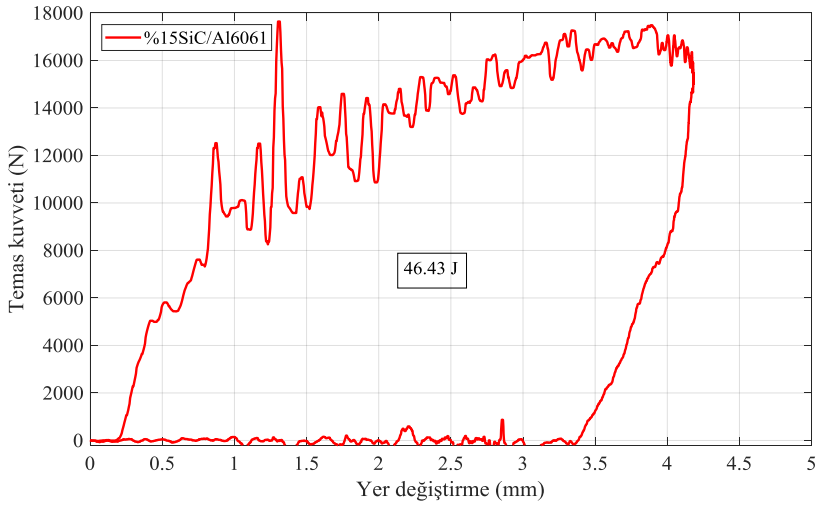
Şekil 3.22. %10 SiC/Al6061 numunesine ait temas kuvveti – yer değiştirme eğrisi.



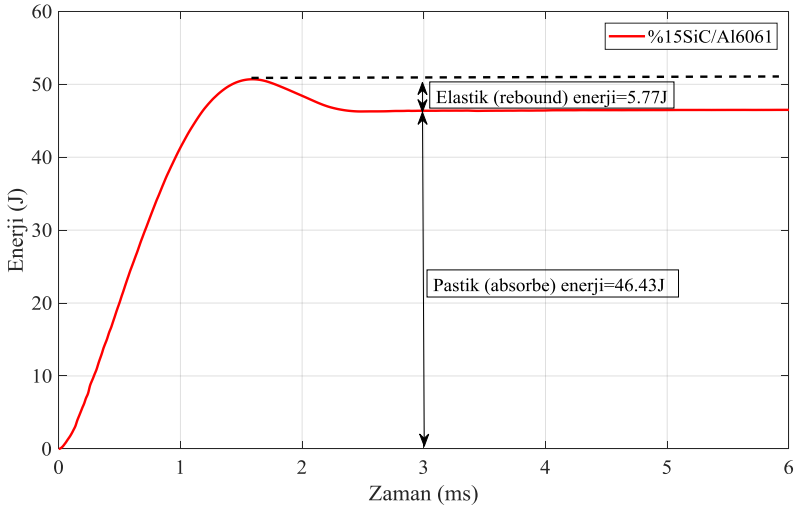
Şekil 3.23. %10 SiC/Al6061 numunesine ait enerji - zaman eğrisi.



Şekil 3.24. %15 SiC/Al6061 numunesine ait temas kuvveti - zaman eğrisi.

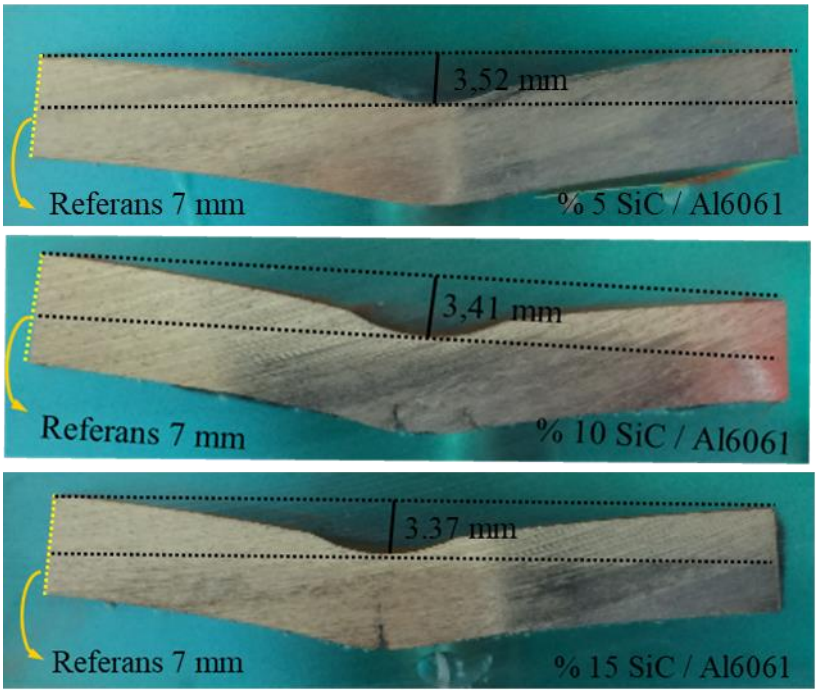


Şekil 3.25. %15 SiC/Al6061 numunesine ait temas kuvveti – yer değiştirme eğrisi.



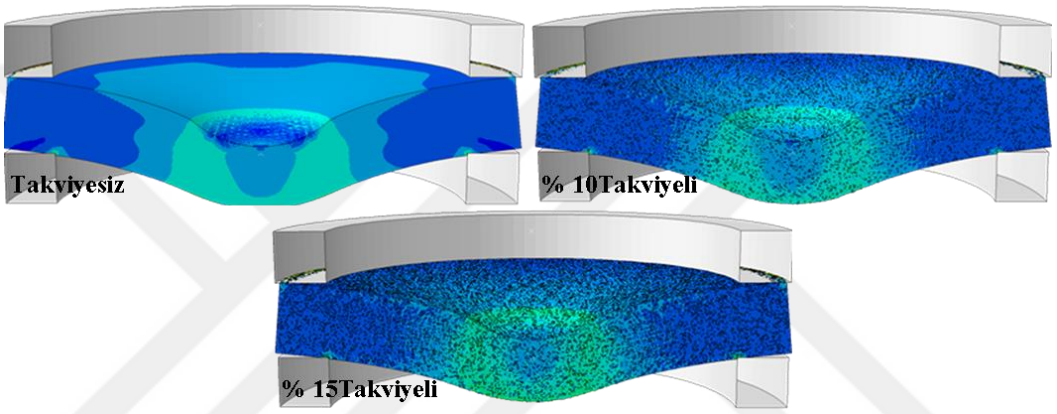
Şekil 3.26. %15 SiC/Al6061 numunesine ait enerji - zaman eğrisi.

Gerek temas kuvveti - zaman gerekse de temas kuvveti - yer değiştirme eğrileri incelendiğinde hem B_4C takviyelilerde hem de SiC takviyelilerde maksimum temas kuvvetine erişinceye kadar eğride süreksizlikler göze çarpmaktadır. Bu süreksizlikler esnasında matriste çatlamalar meydana geldiği söylenebilir. Keskin inişler de ise takviye elemanında kırılmalar meydana geldiği yorumu yapılabilir. Tıpkı B_4C takviyeli kompozitlerde olduğu gibi SiC takviyeli kompozit numunelerde de % 5, 10, 15 oranında takviye yapıldığı zaman bu durumun darbe davranışını etkilediği ancak dikkate değer oranda değiştirmediği anlaşılmıştır. Takviyesiz numuneye göre ciddi değişim gösterip kendi aralarında çok büyük farkların olmaması takviye miktarındaki yetersizlik olarak düşünülmekte ve daha fazla oranda takviye oranı çeşitliliğini arttırıp test yapılmasına karar verilmiştir. B_4C ve SiC takviyeli kompozitlerin darbe davranışları incelendiğinde takviye elemanı türünün darbe üzerinde belirgin bir değişikliğe sebep olmadığı ve B_4C malzemesinin SiC malzemesine göre daha az ulaşılabilir ve daha pahalı olması sebebi ile bundan sonra yapılacak testlerde SiC takviye oranında devam edilmesine karar verilmiştir. Bu bağlamda takviye oranı etkisini detaylı incelemek için % 20, 30, 40 oranında takviye içeren numuneler üretilip aynı şartlarda darbe testlerine tabi tutulmuşlardır.



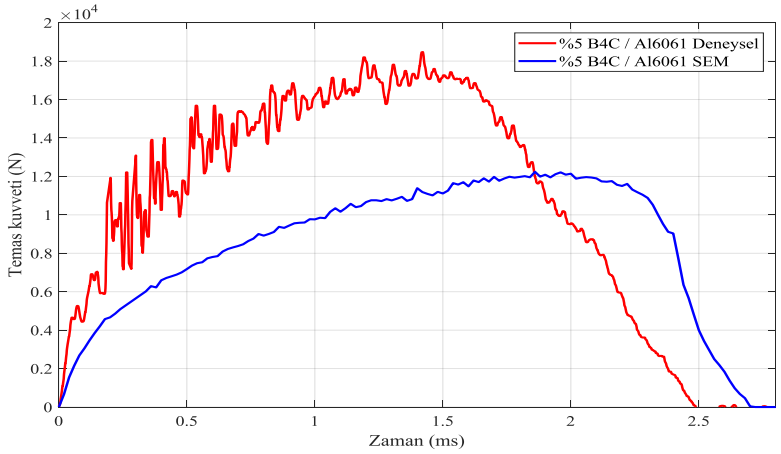
Şekil 3.27. SiC/Al6061 numunelerine ait plastik deformasyon görüntüleri.

% 5, 10, 15 oranında takviye elemanı SiC ve B_4C içeren kompozit numunelerin darbe testleri deneyselin yanı sıra sonlu elemanlar metodu (SEM) kullanılarak ta gerçekleştirilmiştir. Bunun için Abaqus Sofware paket programı kullanılmıştır. Modelde takviye elemanını belirlemek adına meşlenmiş elemanlar içerisinden rastgele bir birim hücre seçip o hücreye takviye elemanı özellikleri tanımlayacak olan bir kod python yardımı ile yazılmıştır. Bunun yanında Johnson-Cook ve Johnson-Holmquist tanımlamaları gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.28'de takviye elemanı dağılımı görülebilmektedir.

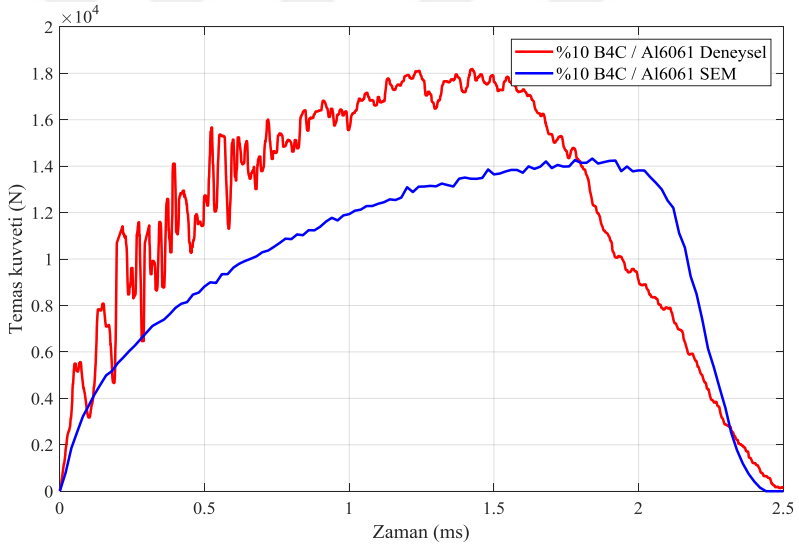


Şekil 3.28. Farklı oranda takviye içeren numunelere ait takviye elemanı dağılımı görüntüleri.

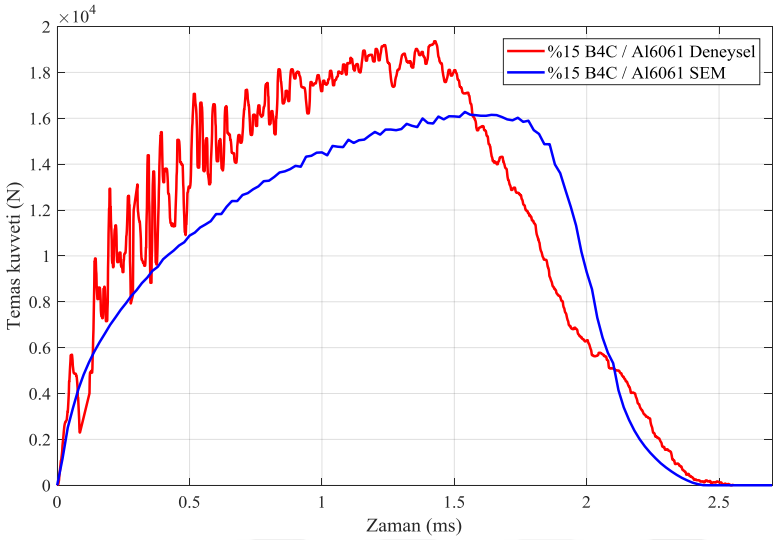
Şekil 3.29, 3.30, 3.31'de % 5, 10, 15 oranında takviye B_4C içeren numunelerin temas kuvveti zaman eğrileri yer almaktadır. Bu grafiklerde deneysel ve sonlu elemanlar metodu (SEM) ile yapılan analiz sonuçları çizdirilmiştir. Deneysel ve SEM analizleri kıyaslandığında temas süreleri genellikle örtüşürken maksimum temas kuvvetlerinde uyuşmazlık görülmektedir. Bunun yanında takviye oranı arttıkça deneysel ve SEM sonuçlarının benzeşme oranlarının da arttığı gözlemlenmektedir. Hem deneysel hem de SEM sonuçlarına bakıldığında takviye oranı arttıkça temas süresinin düştüğü ve maksimum temas kuvvetinin arttığı gözlemlenmiştir. Bu durum takviye oranının artması ile birlikte kompozit yapının rijitliğinin artma eğiliminde olduğunu göstermektedir.



Şekil 3.29. %5 B_4C/Al6061 numunesine ait deneysel ve nümerik temas kuvveti - zaman eğrileri.

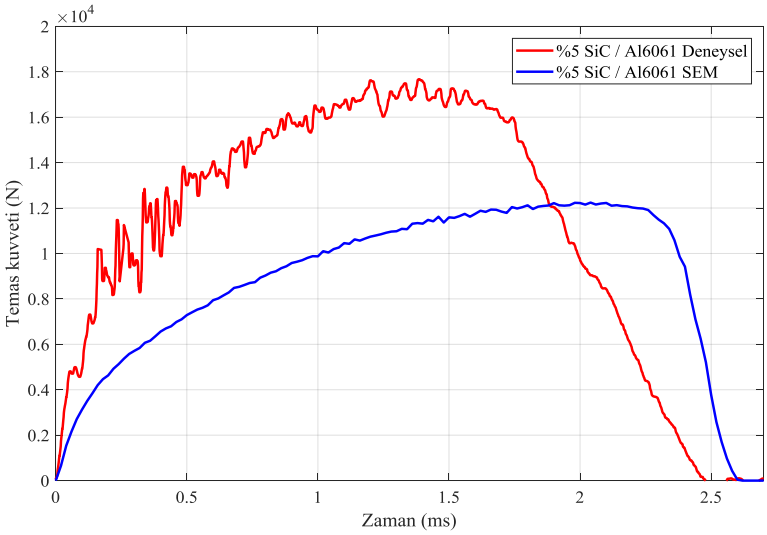


Şekil 3.30. %10 B_4C/Al6061 numunesine ait deneysel ve nümerik temas kuvveti - zaman eğrileri.

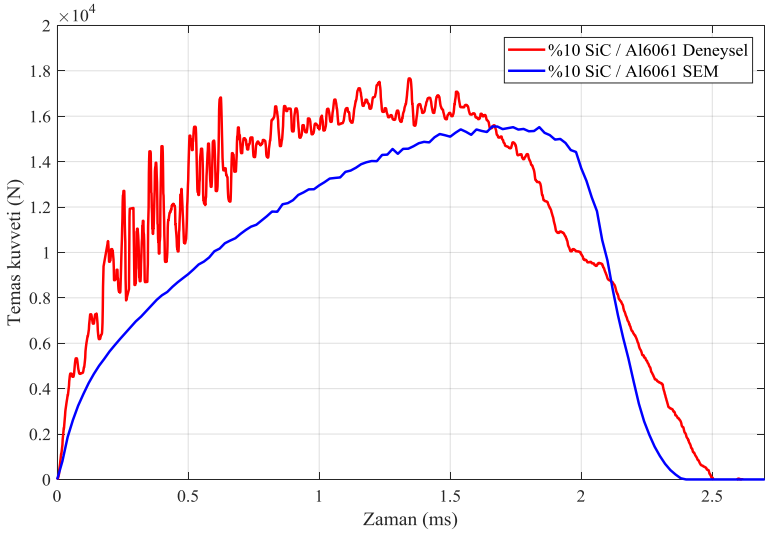


Şekil 3.31. %15 B_4C/Al6061 numunesine ait deneysel ve nümerik temas kuvveti - zaman eğrileri.

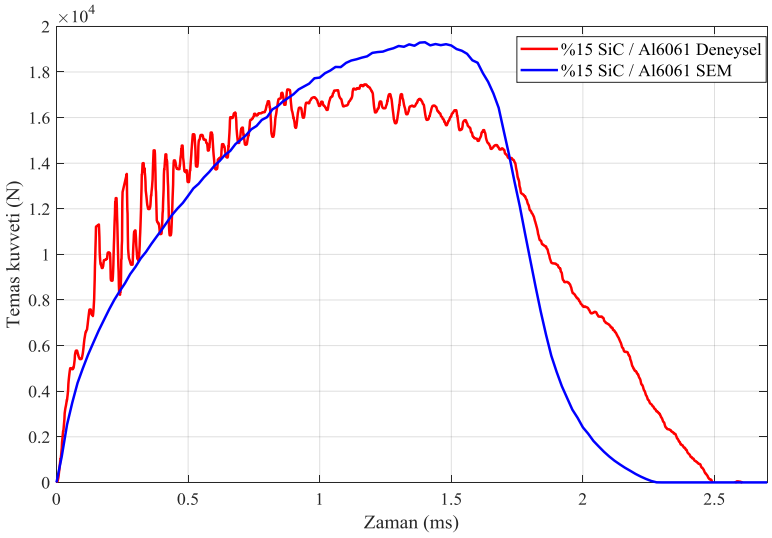
%5, 10, 15 oranında takviye SiC barındıran numunelerin temas kuvveti - zaman eğrileri Şekil 3.32, Şekil 3.33 ve Şekil 3.34'te sunulmuştur. Bu şekillerde deneysel ve SEM ile yapılan analiz sonuçları çizdirilmiştir. Deneysel ve SEM analizleri kıyaslandığında temas süreleri genellikle uyumluyken maksimum temas kuvvetlerinde örtüşmeme hali görülmektedir. B_4C takviyeli kompozitlerin aksine burada %15 takviye içeren kompozit malzemede SEM temas kuvveti deneysel olarak ölçülenin üzerine çıkmıştır. Temas süresi ve maksimum temas kuvveti açısından incelendiğinde maksimum benzerlik %10 SiC içeren kompozit malzemede elde edilmiştir. Deneysel sonuçlar incelendiğinde temas süresinin takviye oranından neredeyse hiç etkilenmediği gözlemlenmiştir. Bunun yanında maksimum temas kuvvetin de ise küçük farklılıklar gözlemlenmiştir. Bu durum takviye oranının %5-15 aralığında olması kompozit numunenin darbe davranışını etkileme açısından yetersiz olduğu sunucunu ortaya çıkarmıştır.



Şekil 3.32. %5 SiC/Al6061 numunesine ait deneysel ve nümerik temas kuvveti - zaman eğrileri.

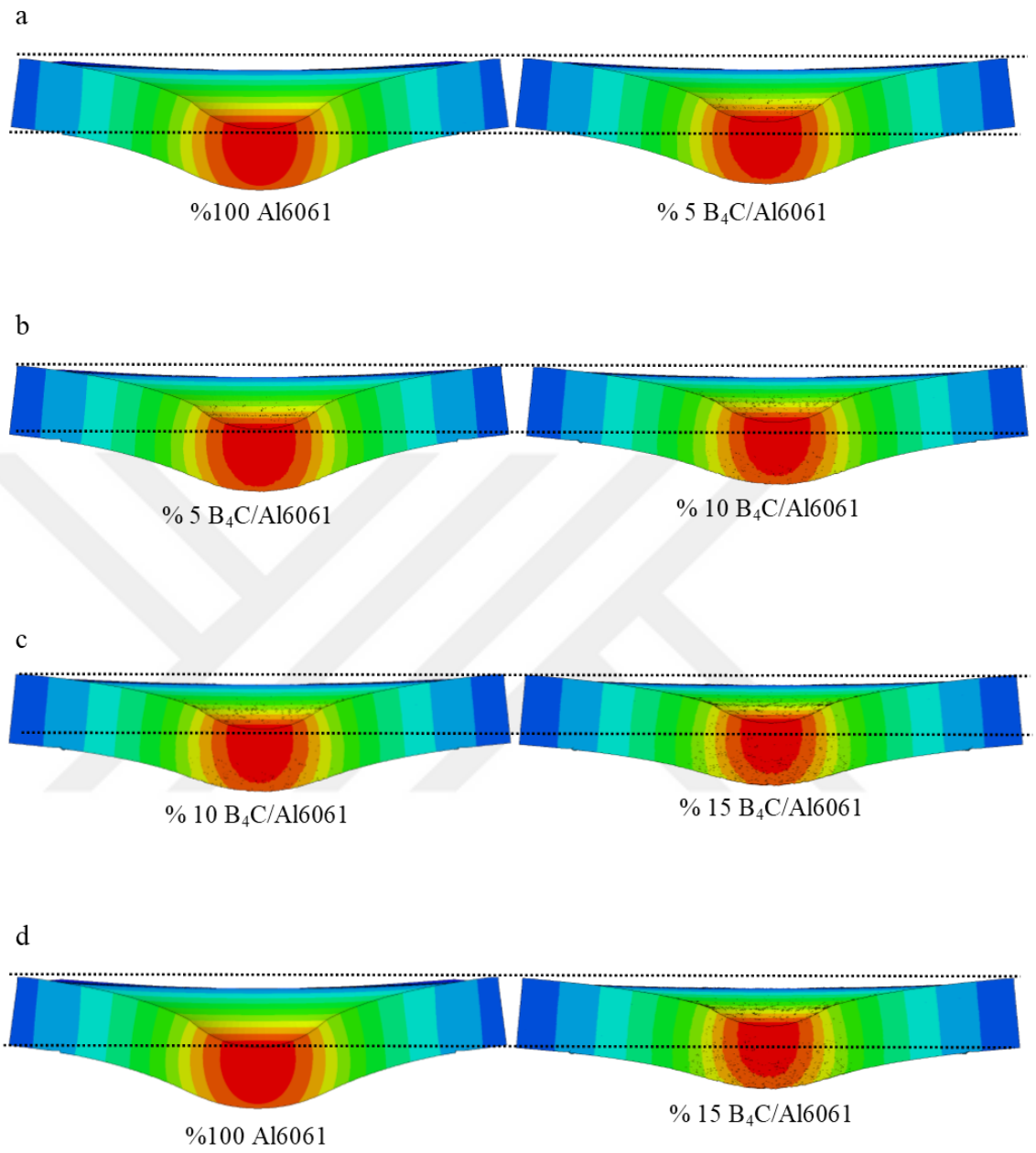


Şekil 3.33. %10 SiC/Al6061 numunesine ait deneysel ve nümerik temas kuvveti - zaman eğrileri.

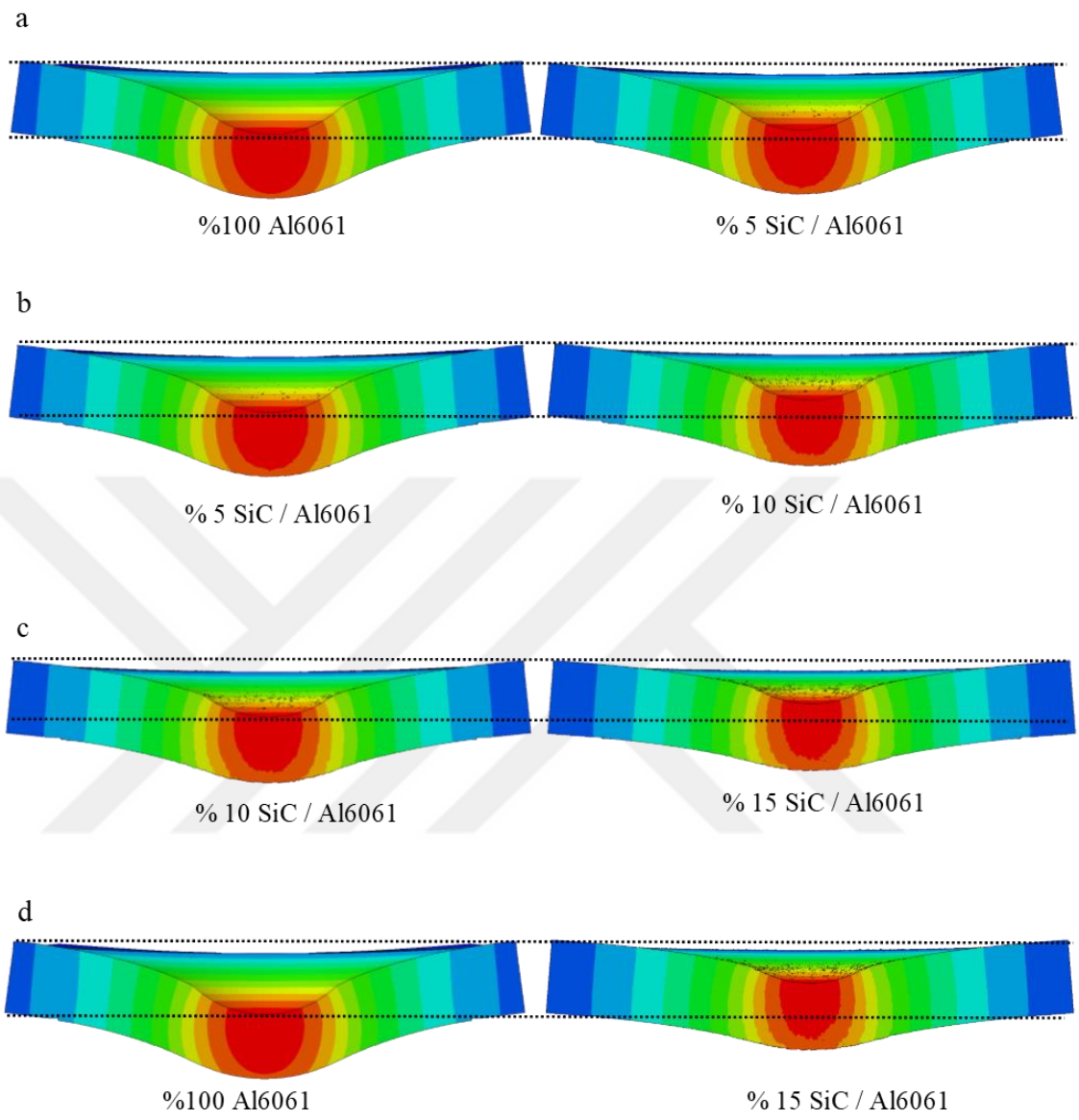


Şekil 3.34. %15 SiC/Al6061 numunesine ait deneysel ve nümerik temas kuvveti - zaman eğrileri.

% 5, 10, 15 oranında takviye (B_4C ve SiC) içeren kompozit numuneler için gerçekleştirilen analizler sonucu elde edilen çökme miktarlarını referans doğruları yardımı ile karşılaştırmalı gösteren görüntüler B_4C ve SiC takviyeleri için sırası ile Şekil 3.35 ve Şekil 3.36'da verilmiştir. Karşılaştırmalı sonuçların verildiği bu görseller incelendiğinde deneysel sonuçlardan elde edilen çökme miktarları ile paralellik gösterdikleri saptanmıştır.

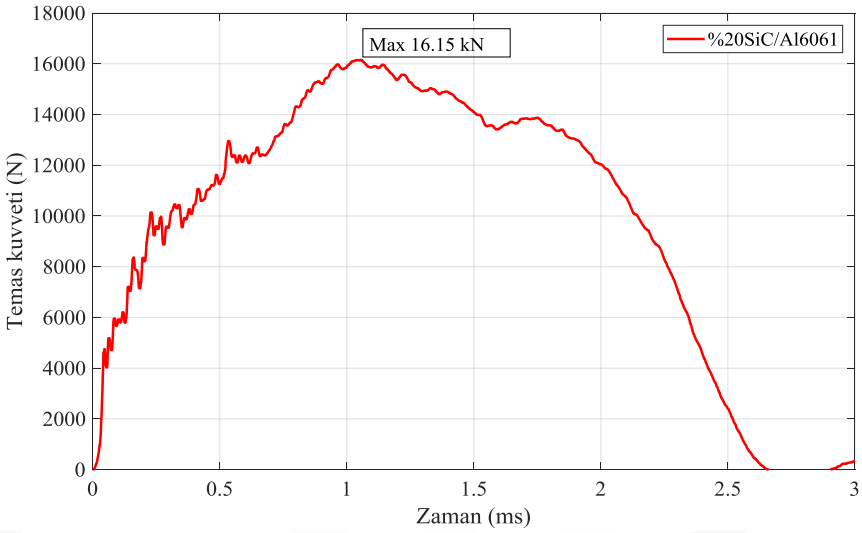


Şekil 3.35. B_4C/Al6061 numunelerine ait plastik deformasyon karşılaştırmaları.

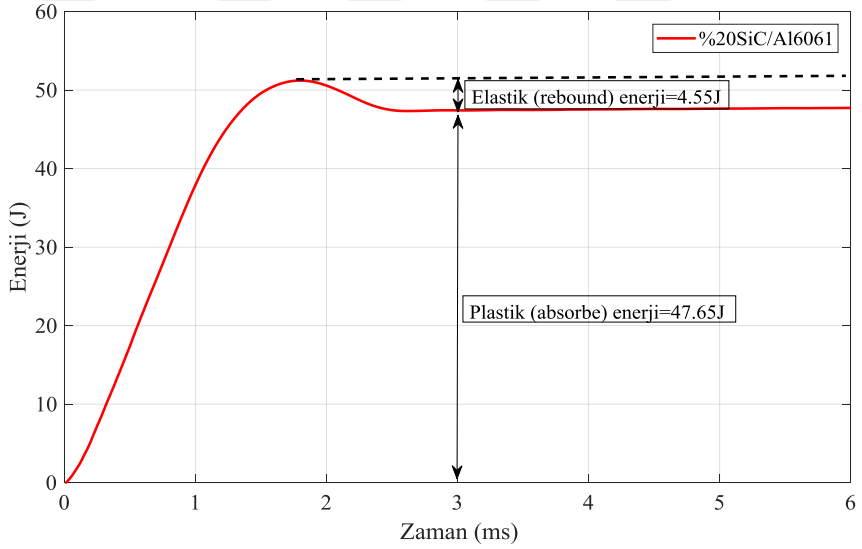


Şekil 3.36. SiC/Al6061 numunelerine ait plastik deformasyon karşılaştırmaları.

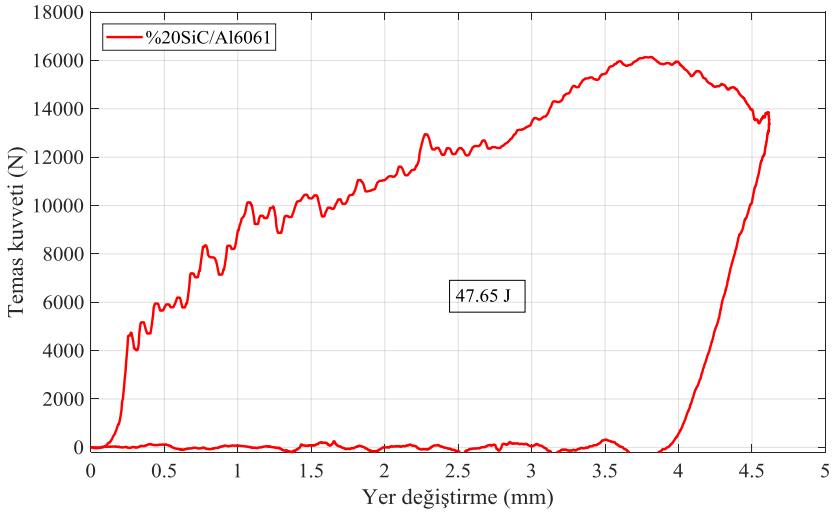
Takviye oranı için %5-15 değerlerinin yetersiz kaldığı düşünülerek % 20, 30, 40 oranın da SiC takviye edilmiş kompozit numuneler üretilip aynı enerjide düşük hızlı darbe testleri yapılmıştır. Sonuçlar Şekil 3. 37, Şekil 3. 38, Şekil 3. 39, Şekil 3. 40, Şekil 3. 41, Şekil 3. 42 ve Şekil 3.43'te sunulmuştur.



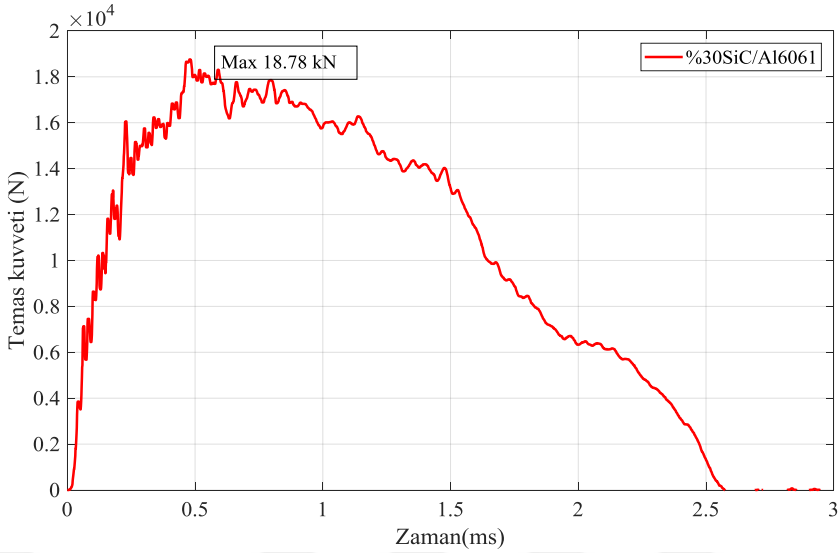
Şekil 3.37. %20 SiC/Al6061 numunesine ait temas kuvveti - zaman eğrisi.



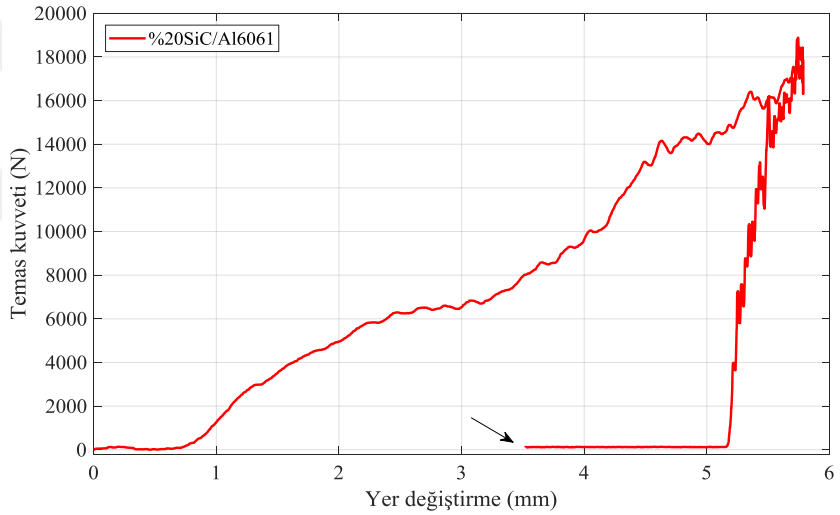
Şekil 3.38. %20 SiC/Al6061 numunesine ait enerji - zaman eğrisi.



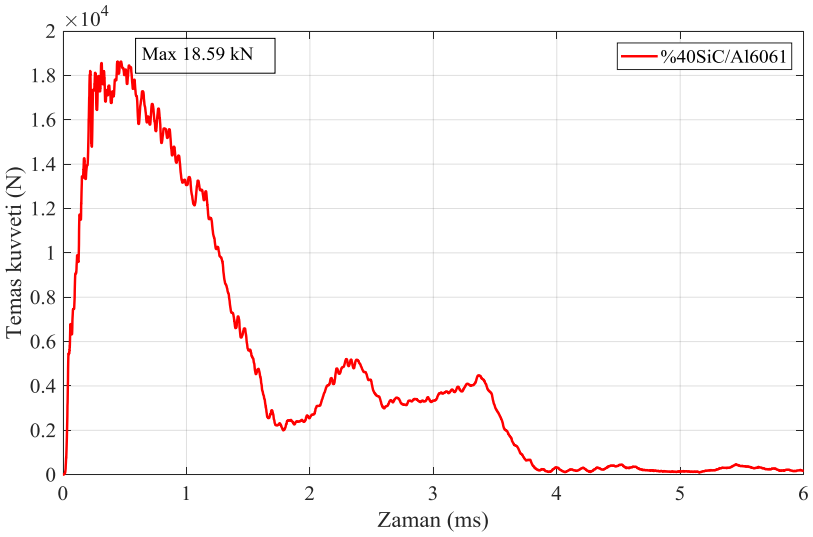
Şekil 3.39. %20 SiC/Al6061 numunesine ait temas kuvveti – yer değiştirme eğrisi.



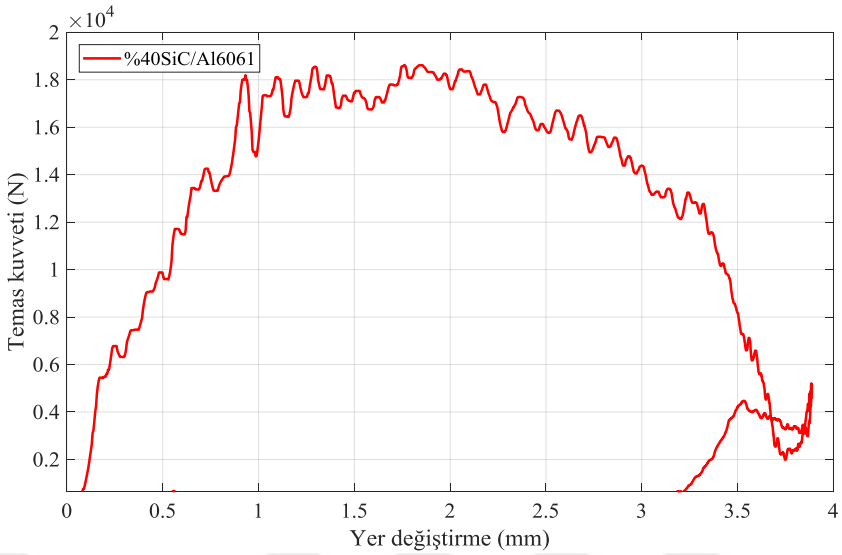
Şekil 3.40. %30 SiC/Al6061 numunesine ait temas kuvveti - zaman eğrisi.



Şekil 3.41. %30 SiC/Al6061 numunesine ait temas kuvveti – yer değiştirme eğrisi.

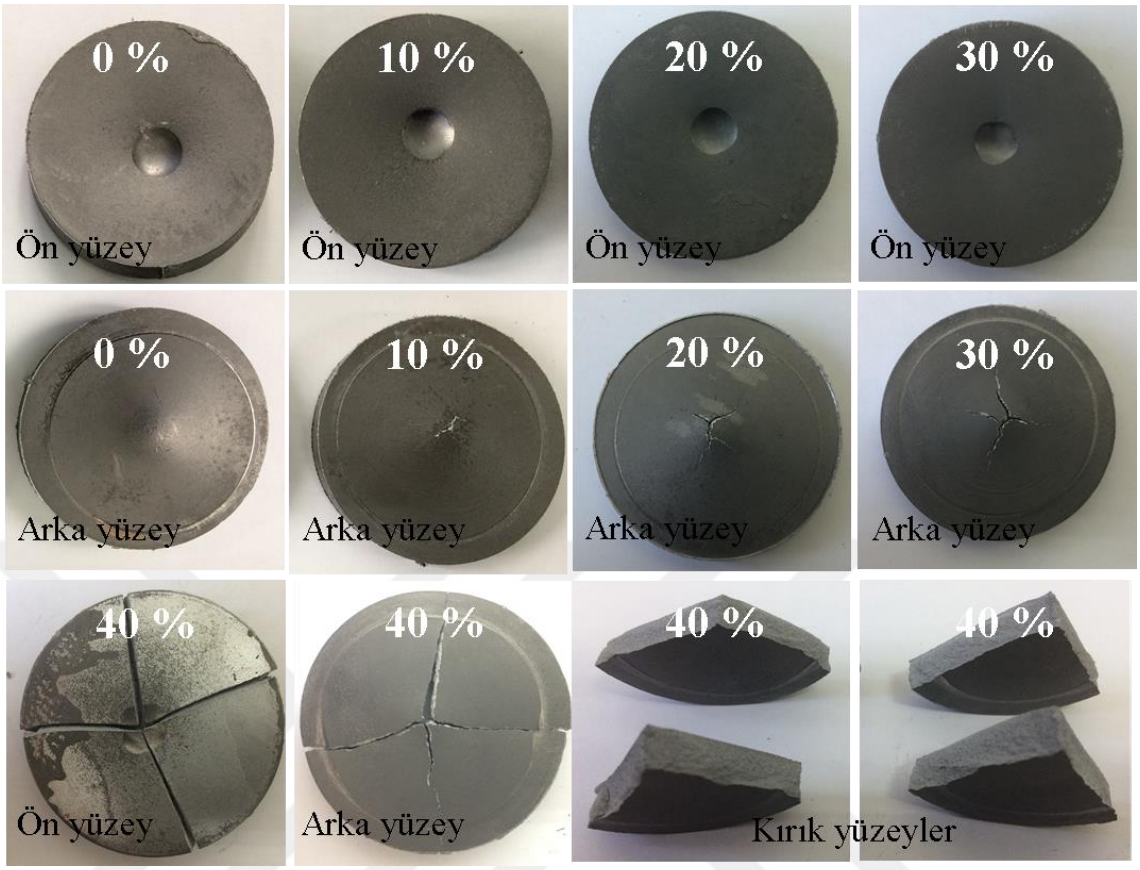


Şekil 3.42. %40 SiC/Al6061 numunesine ait temas kuvveti - zaman eğrisi.



Şekil 3.43. %40 SiC/Al6061 numunesine ait temas kuvveti – yer değiştirme eğrisi.

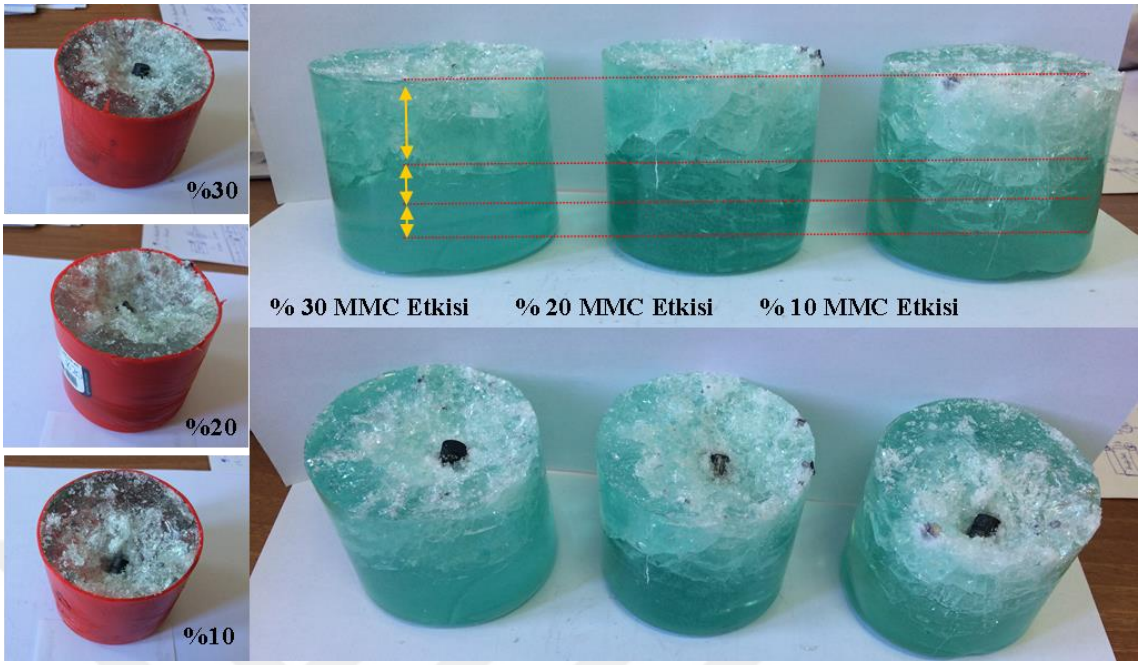
Burada takviye oranın arttıkça kompozitin rijitliğinin arttığı enerjiyi bir noktaya kadar daha iyi absorbe ettiği ve bir noktadan sonra gevrek davrandığı için numunenin parçalandığı gözlemleniştir. % 30 oranında SiC içeren numunenin % 20 oranında SiC içeren numuneye göre daha çok enerji absorbe ettiği görülmüş ancak numune ön ve arka yüzeyleri incelendiğinde numunenin gevrek bir hal aldığı ve çatlak miktarının önemli ölçüde arttığı gözlemlenmiştir. Eşdeğer enerjide darbeye maruz kalan % 40 oranında SiC içeren kompozit numune parçalanmış ve kırık yüzeyler incelendiğinde gevrek bir hal aldığı gözlemlenmiştir (Şekil 3.44). Tüm bu bilgiler ışığında FML yapılar için kullanılacak metal matrisli numunelerin SiC takviye oranının % 20 olmasına kara verilmiş ve bu doğrultuda üretimler gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.44. Düşük hızlı darbe testi sonunda numunelerde meydana gelen hasar görüntüleri.

3.2.2. Metal Matrisli Kompozitlerin Balistik Testleri

Metal matrisli kompozitler de balistik etkinin anlaşılması için % 0, 10, 20, 30 oranında SiC takviyesi içeren kompozitler 7 mm kalınlığında ve 90 mm çapında üretilmiş ve aynı şartlar altında test edilmişlerdir. Tüm atışlar 500 ± 5 m/s hızında gerçekleştirilmiştir. Metal matrisli kompozit malzeme kalınlıklarının toz sarfiyatı göz önünde bulundurularak oldukça düşük olarak üretilmesi nedeni ile yapılan atışlar neticesinde tüm numuneler delinmiştir. Buna bağlı olarak hangi numunenin ne adar direnç gösterdiğinin tespiti için numunelerin arka kısmına epoksi reçine ve sertleştiriciden oluşturulmuş özel bir karışım olan şahit yapı yerleştirilmiştir. Bu şahit yapılarda meydana gelen penetrasyon miktarına göre metal matrisli kompozitlerin balistik dirençleri yorumlanmıştır. Metal matrisli kompozitlerin balistik testlerinde elde edilen veriler Tablo 3.4'te sunulmuştur. Şahit yapı ve penetresyon oranları Şekil 3.45'te görülebilmektedir.

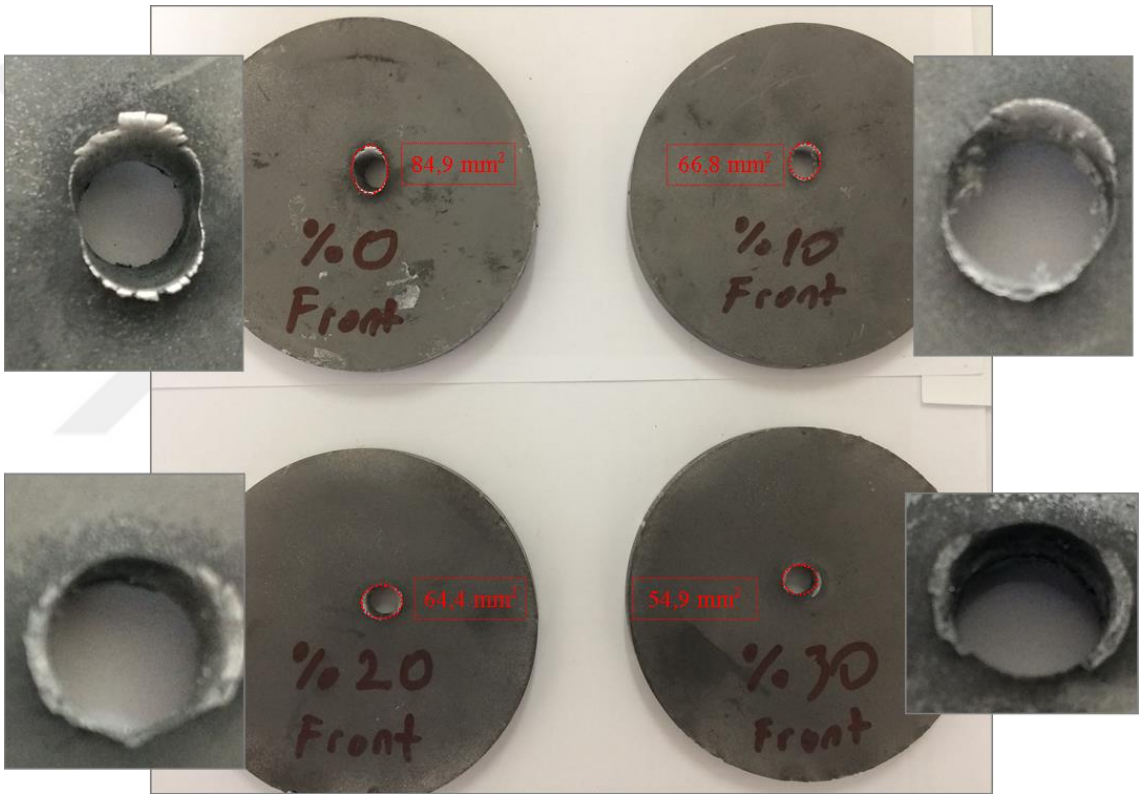


Şekil 3.45. Balistik test sonucu şahit yapı görüntüsü.

Kullanılan şahit yapının üretimi için birçok farklı oranda epoksi reçine ve sertleştiricinin karıştırılması ile balistik şahitlik için en uygun oran tespit edildi. Kullanılan reçine ve sertleştiricinin markaları sırası ile Hexion LR160 ve Hexion MGS LH160'tır. Tablo 3.4 dikkatli incelendiğinde şahit yapıdaki penetrasyon miktarı kompozit numunelerdeki takviye oranının artması ile azalmaktadır. Penetrasyon miktarları incelendiğinde takviyesiz numuneye göre % 10, 20 ve 30 oranında takviye içeren numunelerin balistik direnci sırası ile yaklaşık %18, 33, 55 oranında artmıştır. Ayrıca, diğer takviyeli kompozitler ile kıyaslanacak olursa %30 oranında takviye içeren metal matrisli kompozit numunenin %10 ve 20 takviye içerenlere göre sırası ile % 45 ve 33 daha dirençli olduğu tespit edilmiştir. Ek olarak, %20 oranında takviyelendirilmiş metal matrisli numunenin % 10 takviye içerene kıyasla %18 daha dirençli olduğu belirlenmiştir. Bu durumun muhtemel sebebinin takviye malzemesi SiC ile mermi arasındaki sürtünmenin artan takviye oranı ile artması olabileceği düşünülmektedir.

Tablo 3.4. Metal matrisli kompozitlerin balistik test sonuçları.

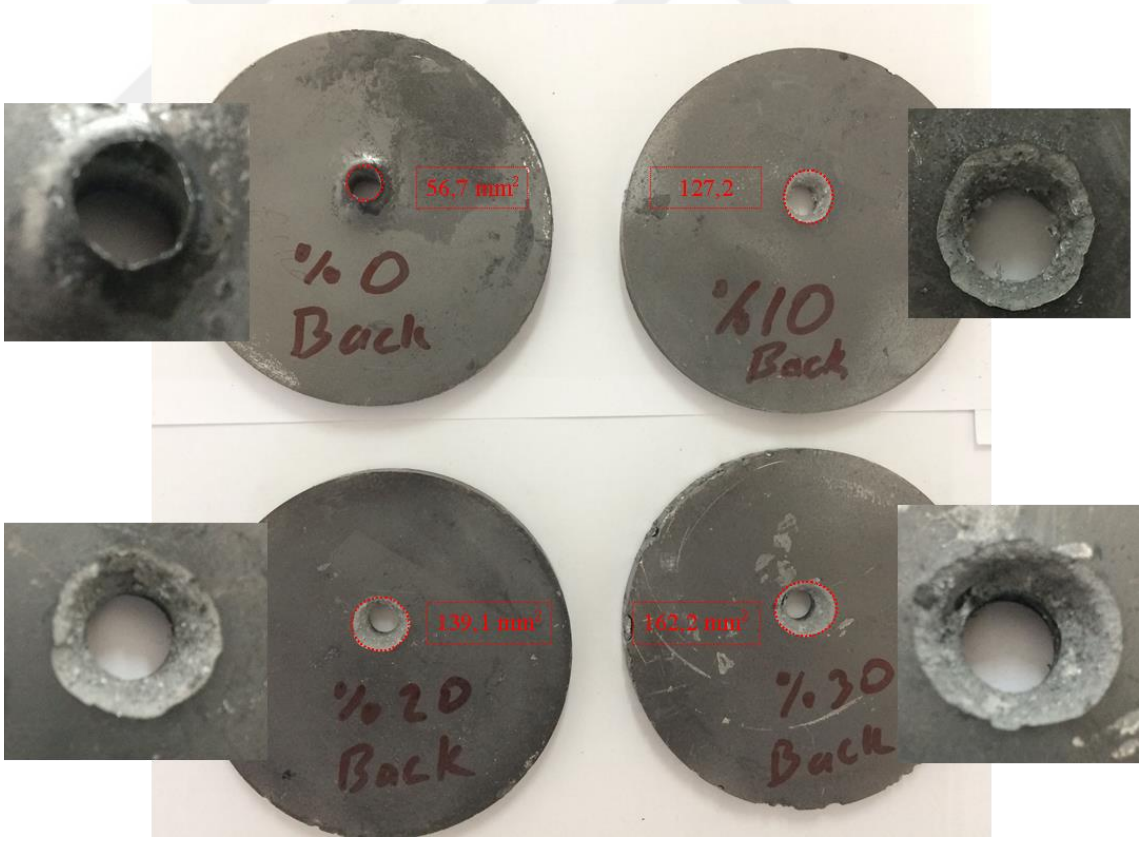
Malzeme	Mermi hızı(m/s)	Şahit yapıdaki penetrasyon miktarı (mm)	Mermi delme alanı (mm^2) (ön yüzey)	Mermi delme alanı (mm^2) (arka yüzey)
Al6061	503	27	84,9	56,7
%10SiC/Al6061	505	22	66,8	127,2
%20SiC/Al6061	495	18	64,4	139,1
%30SiC/Al6061	502	12	54,9	162,2



Şekil 3.46. Balistik test sonrası takviyesiz numune ve metal matrisli kompozitlerin hasar görüntüleri (ön görünüş)

Takviyesiz numune ve metal matrisli kompozitlerin balistik test sonrası ön ve arka görünüşleri sırası ile Şekil 3.46 ve Şekil 3.47'de görülebilmektedir. Metal matrisli kompozitlerin ön ve arka görüntüleri dikkatli incelendiğinde takviye oranının mermi giriş ve çıkış deliklerini önemli ölçüde etkilediği açıkça görülebilmektedir. Image J programı yardımı ile yapılan alan ölçümleri Tablo 3.4'te yer almaktadır. Bu değerlere göre takviye oranının artması ile ön taraftaki mermi delinme alanı azalırken arka taraftaki delinme alanı artmaktadır. Bunun yanında metal matrisli kompozit

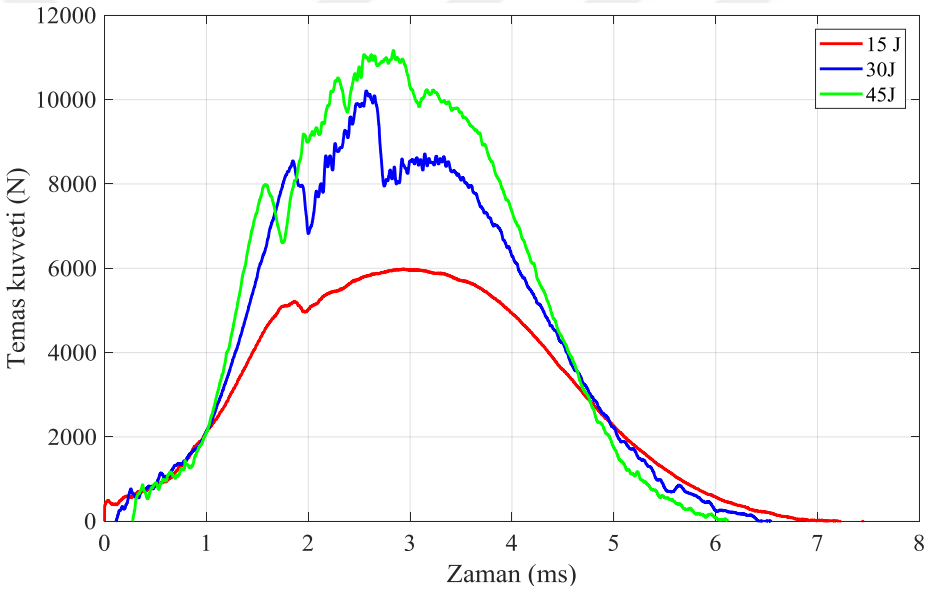
numunelerin ön yüzeyleri incelendiğinde numunelerdeki takviye oranının artması ile petal (taç yaprağı formu) yapı kademeli bir şekilde azalmakta ve spalling (dökülme parçalanma) oluşmaya başlamaktadır. Bunun sebebinin artan takviye oranı ile birlikte metal matrisli kompozitlerin daha gevrek bir yapıya bürünmeleri olduğu düşünülmektedir. Söz konusu numunelerin arka yüzeyleri incelendiğinde, takviyesiz numunede bir hunileşme görülürken bu durum takviye malzemesi SiC eklenmesi ile ortadan kalkmış ve dışa doğru kopma şeklinde ortaya çıkmıştır. Artan takviye oranına bağlı olarak meydana gelen gevrekleşme sonucu artan takviye oranı ile dışa doğru kopma ve dökülme alanlarının arttığı da açıkça görülebilmektedir. Tüm bunlara ek olarak hiçbir numunede mermi deliği dışında numune üzerinde gözle görülebilir bir çatlama veya kırılma, parçalanma gözlemlenmemiştir. Bu durum metal matrisli kompozitlerin takviye oranına bağlı olarak gevrekliğinin çalışılabilir sınırlar içerisinde olduğunu göstermektedir.



Şekil 3.47. Balistik test sonrası takviyesiz numune ve metal matrisli kompozitlerin hasar görüntüleri (arka görünüş)

3.2.3 Polimer Matrisli Kompozitlerin Düşük Hızlı Darbe Testleri

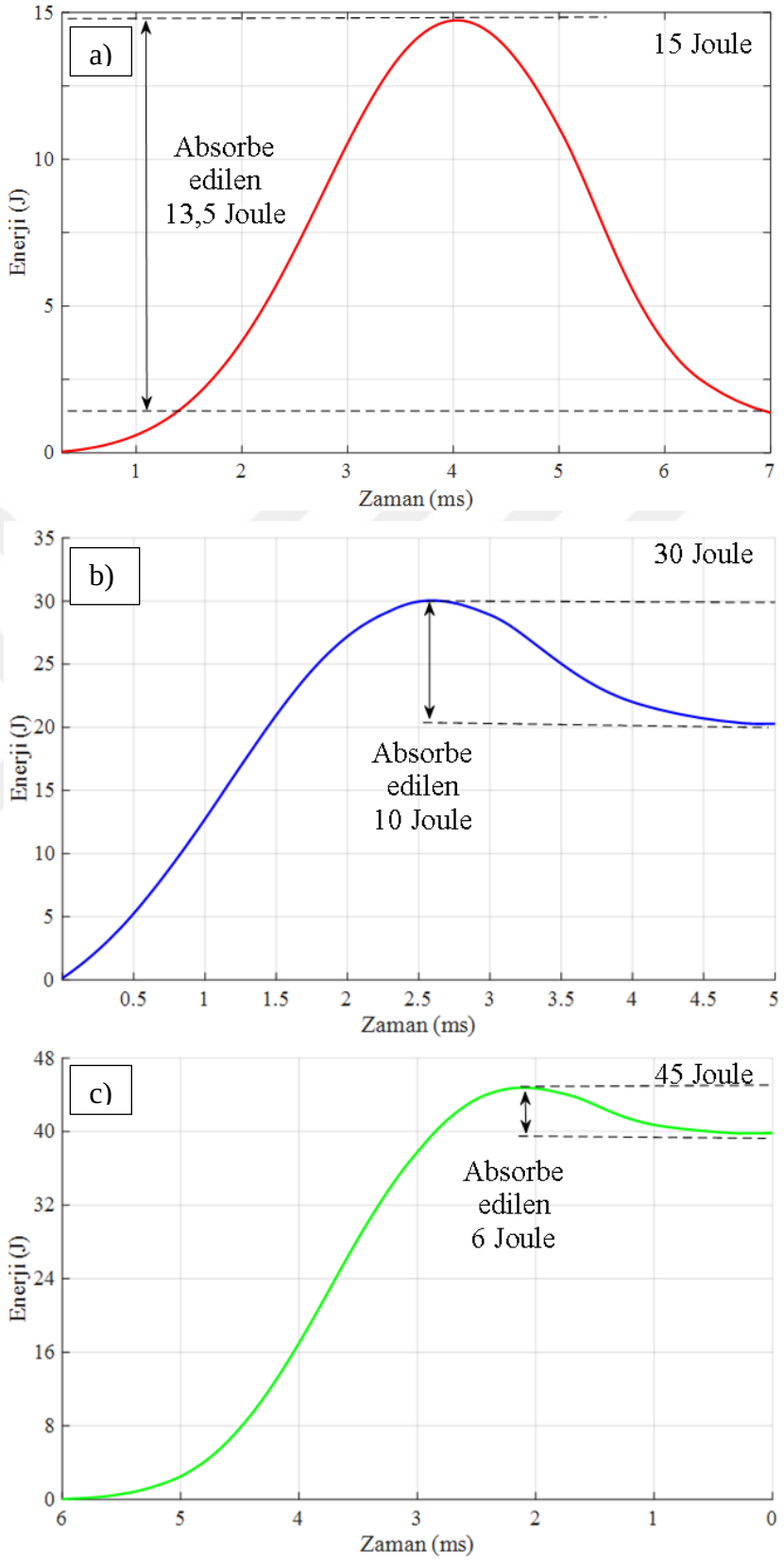
Sandviç yapıda metal matrisli kompozitle birlikte kullanılacak polimer matrisli kompozitin düşük hızda darbe davranışını analiz etmek için 3 mm kalınlığında 9 mm çapında prepreg yöntemi ile aramid bazlı polimer matrisli kompozitler üretilip üç farklı darbe enerjisine maruz bırakılmıştır. Polimer matrisli kompozitin prepregten üretimi bölüm 1.4.4 detaylı bir şekilde anlatılmıştır. Kompozit numunelere oda sıcaklığında 15, 30, 45 joule darbe enerjisi ile 10 mm yarıçaplı, 5,045 kg ağrlığındaki yarı küresel uçlara 2.44, 3,44, 4,22 m/s hızlar verilerek uygulanmıştır. Darbe testi sonrası elde edilen temas kuvveti zaman ve enerji zaman eğrileri Şekil 3.48 ve Şekil 3.49'da verilmiştir.



Şekil 3.48. Prepregten üretilmiş polimer matrisli kompozitlere ait temas kuvveti zaman eğrileri.

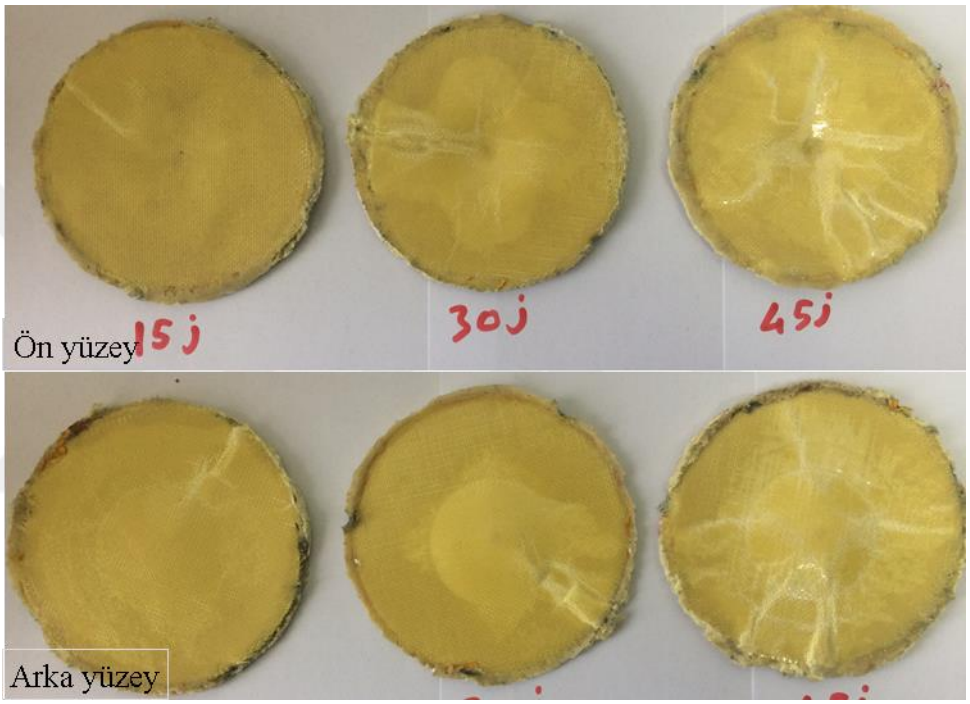
Şekil 3.48'de de görüleceği üzere temas kuvveti zaman eğrilerinin darbe enerjisi arttıkça düzensizleştiği tespit edilmiştir. Maksimum temas kuvveti 15, 30 ve 45 J enerji uygulandığında sırası ile yaklaşık olarak 6, 10 ve 11 kN dur. Temas sürelerinin de enerji ile birlikte azaldığı net bir şekilde görülebilmektedir. Eğriler dikkatli incelendiğinde darbe enerjisi 15 J olduğunda kompozit malzemenin darbeye daha uniform bir cevap verdiği darbe enerjisinin 30 ve 45 J değerine çıkarıldığında ise numunelerde matris ve elyaf hasarlarının meydana geldiği anlaşılmaktadır. Darbe testinden elde dilen enerji - zaman eğrileri ise Şekil 3.49'da sunulmuştur. Burada aynı şartlarda üretilmiş ve aynı geometriye sahip olan numunelerine uygulanan darbe neticesinde darbe enerjisinin artması ile polimer matrisli kompozitin uygulanan darbeyi absorbe etme yeteneklerinin

düştüğü tespit edilmiştir. Numunelere 15, 30, 45 J darbe enerjisi uygulandığında numunelerin sırası ile 13.5, 10 ve 6 J enerji absorbe ettikleri anlaşılmıştır. Yüzde ile ifade edilecek olursa 15 J enerji uygulandığında polimer matrisli kompozit malzeme bu enerjinin % 90'ını soğururken bu oran 30 ve 45 J uygulandığında sırası ile %33,3 ve %13,3 tür.



Şekil 3.49. Polimer matrisli kompozitlere ait a)15 J b) 30 J ve c) 45 J değerindeki enerji - zaman eğrileri.

Darbe uygulanmış numunelerin önden ve arkadan çekilmiş görüntüleri Şekil 3.50'de verilmiştir. Numune yüzeyleri incelendiğinde elde edilen temas kuvveti - zaman eğrileri ile paralel sonuçlar gösteren matris ve fiberdeki hasarlar net bir şekilde görülebilmektedir. Bu testler sonucu elde edilen temas kuvveti - zaman ve enerji - zaman verileri modelleme yapılırken literatürden tespit edilen polimer matrisli kompozitin modellemesinde kullanılacak girdiler sonucu elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılarak veri doğrulanması sağlanmıştır.



Şekil 3.50. Düşük hızlı test sonrası PMK yapıların hasar görüntüleri.

3.3. Sandviç Yapıların Balistik Testleri

Sandviç yapılar temel olarak beş farklı konfigürasyonda üretilmiştir. Bu konfigürasyonlar aşağıda verilmiştir. Ayrıca, bu numunelerin yapısal dizilimlerine ait temsili bir görüntü Şekil 3.51'de sunulmuştur.

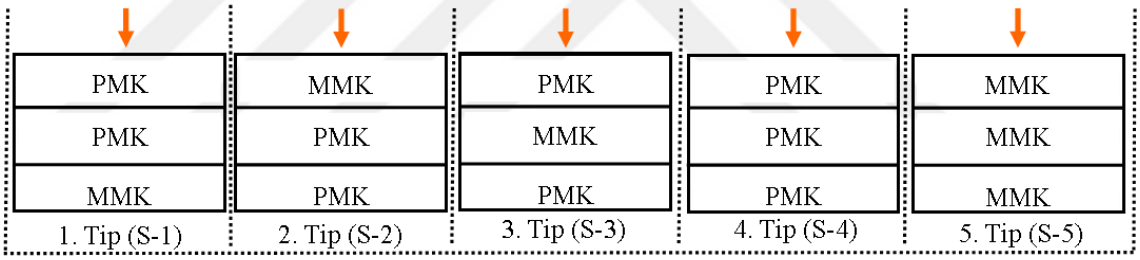
Birinci tip (S-1) : Ön tarafı 20 katman aramit fiberli prepregden oluşturulmuş 5 mm kalınlığa sahip polimer matrisli kompozit (PMK) arka tarafı 13 mm kalınlığa sahip % 20 oranında SiC takviyeli Al6061 matrisli metal matrisli kompozitten (MMK) meydana gelmektedir.

İkinci tip (S-2) : Yapı olarak birinci tip numune ile aynı formda olan ikinci tip numune ters çevrilip balistik teste maruz bırakılmıştır. Yani ön taraf 13 mm kalınlığındaki MMK'dan arka taraf ise 5 mm'lik PMK'dan meydana gelmektedir.

Üçüncü tip (S-3) : Bu tip numuneler 13 mm'lik MMK arada kalacak şekilde ön ve arka yüzeyi 10'ar katman yani 2.5 mm'lik PMK'dan oluşmaktadır. Toplam kalınlık 18mm olarak diğer numuneler ile eşdeğerdir.

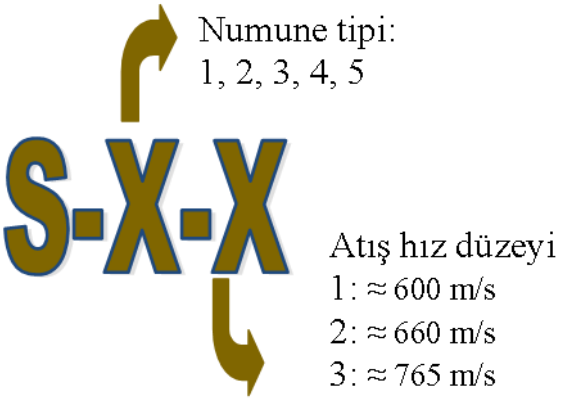
Dördüncü tip (S-4): Dördüncü tip numuneler MMK barındırmaksızın önceki tip numunelere eşdeğer kalınlıkta (18mm) olacak şekilde 72 katman aramit fiberli prepregden üretilmiş PMK'dan meydana gelmektedir.

Beşinci Tip (S-5) : Bu tip numuneler yaklaşık olarak 18 mm olacak şekilde %20 oranında SiC takviyeli Al6061 matrisli PMK'dan meydana gelmektedir. Bu tip numunede PMK tabakası bulunmamaktadır.



Şekil 3.51. Numune tiplerinin sınıflandırılması.

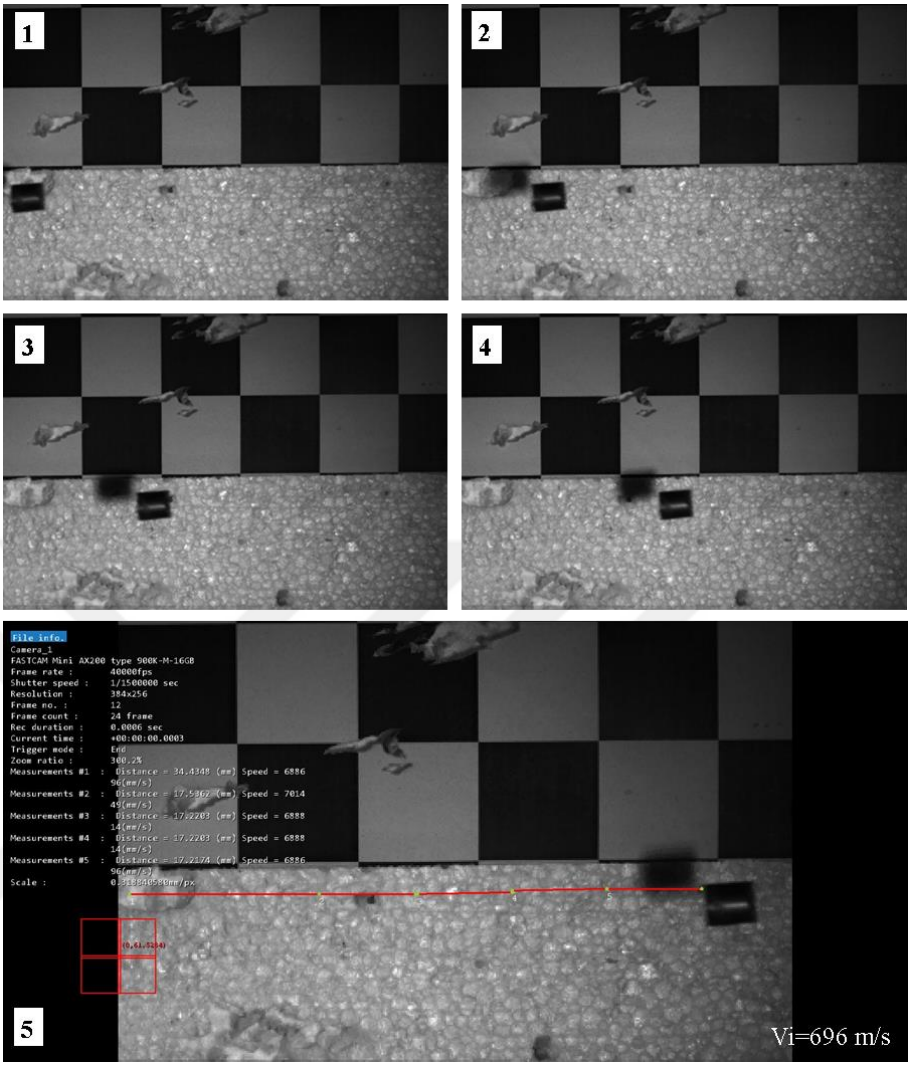
Beş farklı tipte üretilen numuneler, toplam üç farklı düzeydeki hıza maruz bırakıldılar. Bunlar; 1. Hız düzeyi yaklaşık olarak 600 m/s, ikinci hız düzey 660 m/s iken üçüncü hız düzeyi 765 m/s'dir. Numuneler, bundan sonraki anlatımda Şekil 3.52'de gösterildiği gibi ifade edilecektir. Bir örnekle açıklanacak olursa; S-2-3 kodlu numune ele alalım buradaki 2 rakamı 2. tip numune olduğunu yani ön tarafın MMK'dan arka tarafın PMK'dan oluştuğunu 3 rakamı ise 3. hız düzeyinde atışa maruz bırakıldığını yani yaklaşık olarak 765 m/s hızındaki mermiye maruz kaldığını ifade etmektedir.



Şekil 3.52. Sandviç yapıların tiplerine ve balistik test hızlarına göre sınıflandırılması.

Yaklaşık olarak 600, 660 ve 765 m/s hızında balistik testlere tabi tutulan numunelerden elde edilen sonuçlar numunelerin delinip delinmemesi baz alınarak iki şekilde incelenmiştir. Delinmeyen numunelerin kıyaslanması için merminin ucundan itibaren meydana gelen penetrasyon miktarı kullanılmıştır. Delinen numunelerin kıyaslanması ise merminin numuneden çıkış hızı baz alınarak değerlendirilmiştir. Balistik testlerin çıkış hızı tespiti için yüksek hızda görüntü yakalayabilme kabiliyetine sahip olan Photran® marka kamera ile kayıt yapılmış ve çıkış hızları tespit edilmiştir. Atış yapılırken mermi hızı mevcut balistik test cihazı üzerindeki ışık perdesi aracılığı ile ölçülebilmektedir. Bu sayede giriş ve çıkış hızı belli olan numunelerin absorbe ettikleri enerji miktarları da hesaplanmıştır.

İlk olarak kameradan elde edilen hız sonucu ile giriş hızını ölçen ışık perdesinin ölçümü arasında uyum olup olmadığının kontrolü için boş bir atış yapılmıştır. Şekil 3.53'te merminin çıkışından itibaren dört farklı kare alınmış ve hız ölçümleri yapılmıştır. Bütün ölçümler saniyede 30000 frame (FPS) olarak gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.53'te görüldüğü üzere merminin çıkış doğrultusunda farklı zamanlarda merminin bulunduğu konumlara göre hız ölçümü birkaç kez yapılıp aritmetik ortalaması alınmıştır. Buna göre atış hızı 696 m/s olarak gerçekleştirilen atışın çıkış hızı (688,6+701,4+688,8)/3= 692,9 m/s olarak ölçülmüştür. Bu sonuçtan da anlaşılacağı gibi %0,44 gibi ihmal edilebilir bir hata payı ile hız ölçümleri birbirleri ile uyumludur.

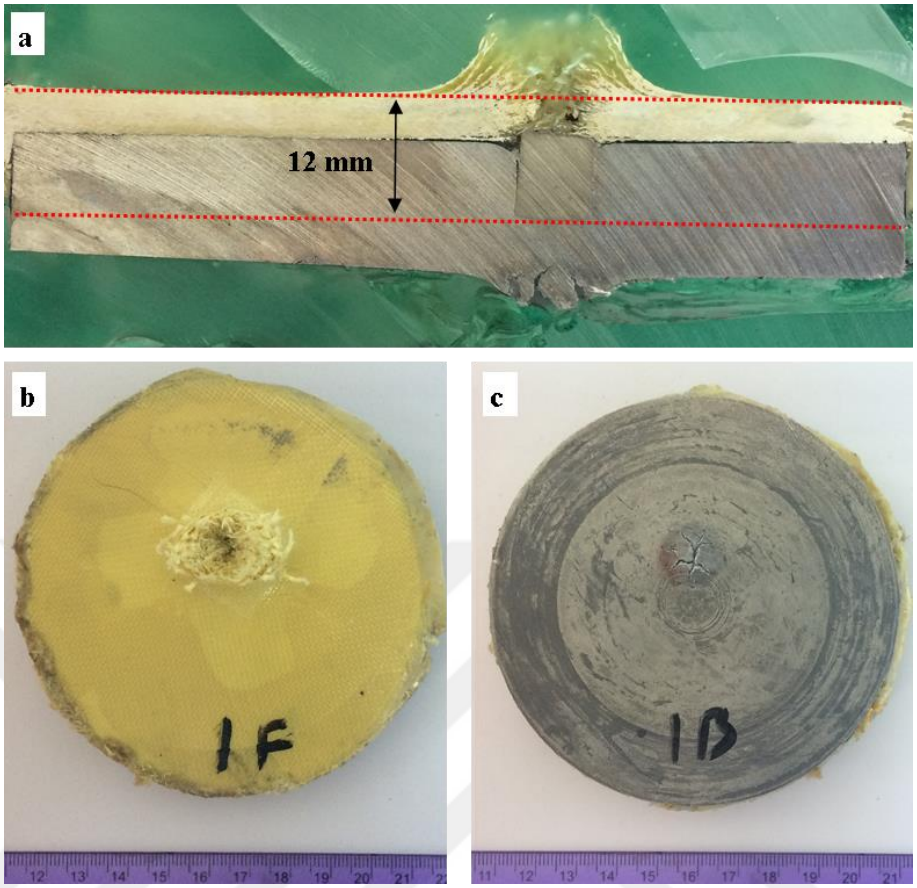


Şekil 3.53. Boş atış ile hız uyumluluğunun tespiti.

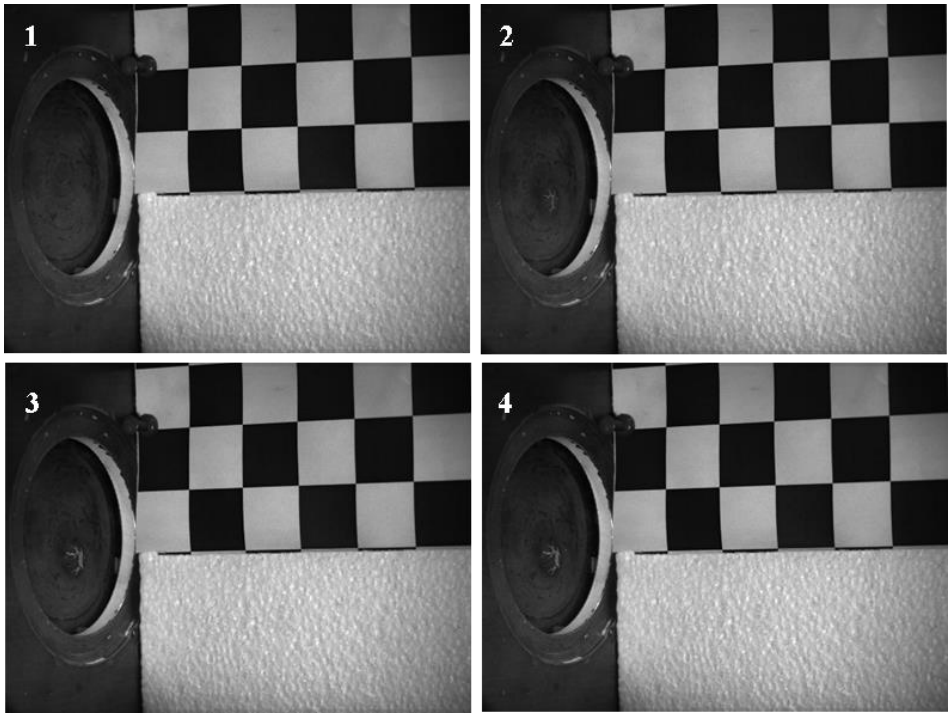
3.3.1. Birinci Tip Numunelerin Balistik Davranışları

Bu bölümde birinci tip numunelerin yani mermi ile ilk karşılaşan yüzeyin PMK, arka tarafın MMK olduğu numuneler üç farklı hız düzeyinde balistik test sonuçları verilmiştir.

S-1-1 numunesine 589,2 m/s hızla 2,9 gr ağırlığındaki FSP mermi ile atış gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen atış sonrası numunenin ön, arka, kesit görüntüsü ve sonrası numune arkasından farklı zamanlarda alınmış ve süreye göre sıralanmış 4 kare Şekil 3.54 ve Şekil 3.55'te görülebilmektedir. S-1-1 numunesinde delinme gerçekleşmemiştir.



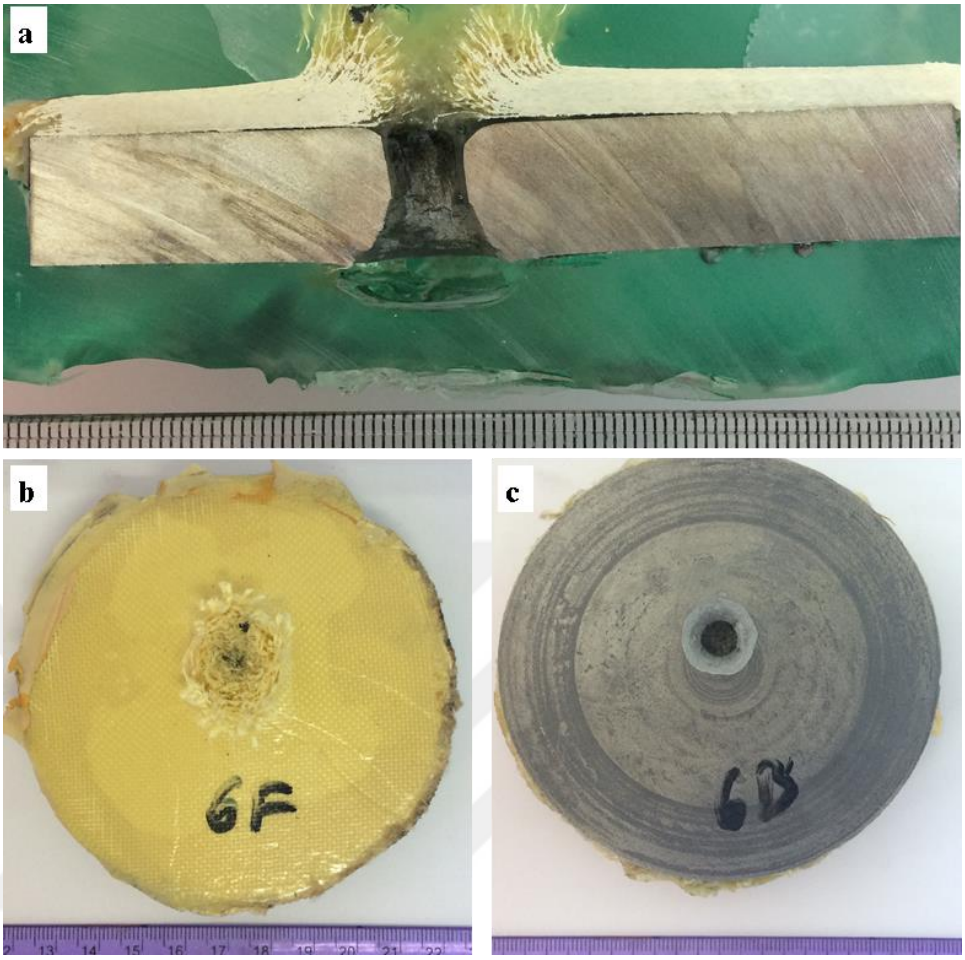
Şekil 3.54. S-1-1'in kesit (a), ön (b) ve arka (c) görüntüleri.



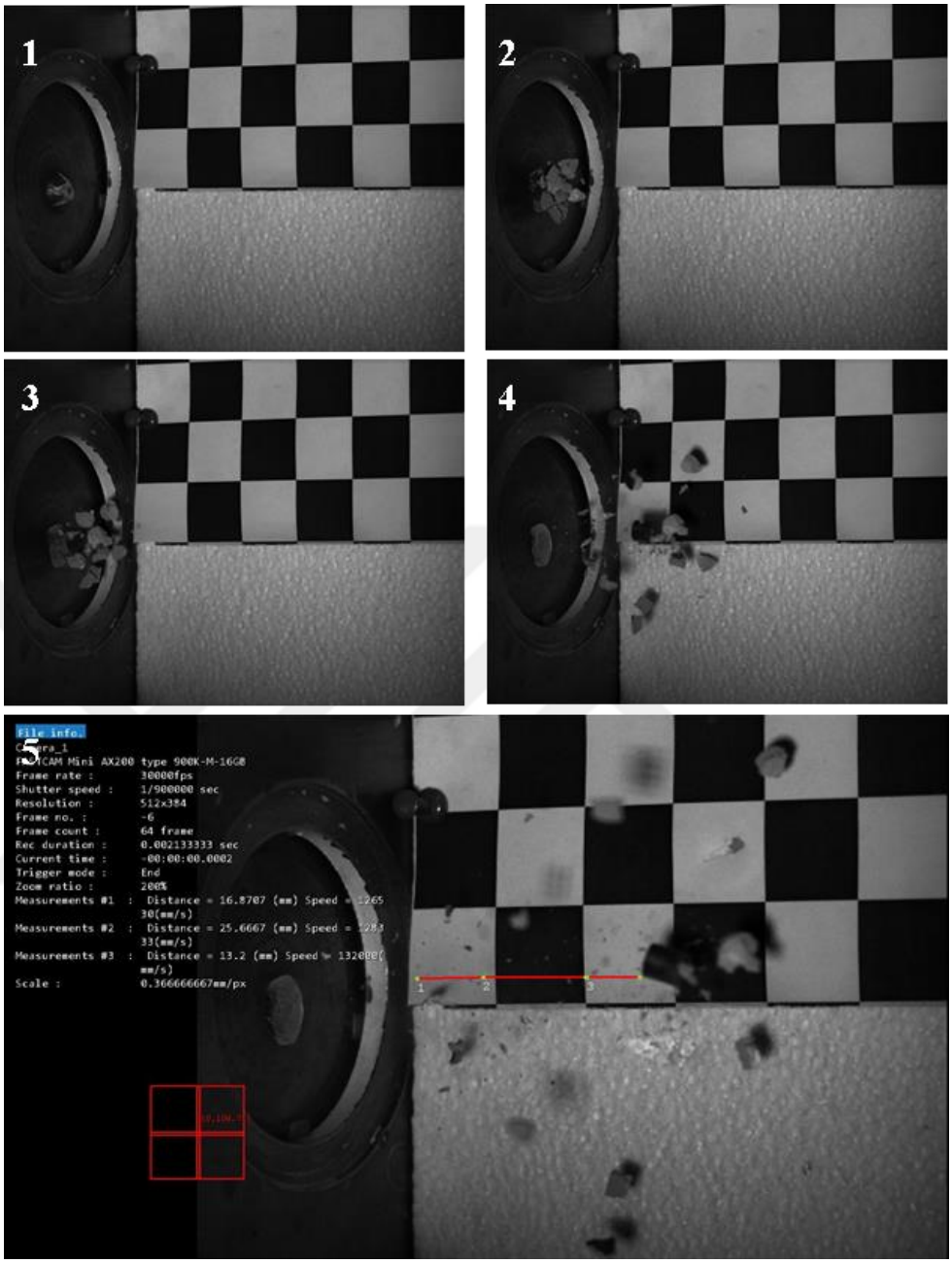
Şekil 3.55. S-1-1'in arkasından atış esnasında alınmış sıralı görüntüler.

Bu sebeple, numune önce epoksi reçine ve sertleştiriciden elde edilen kalıplara alınıp merminin isabet ettiği yerden ortadan ikiye kesilmiş ve kesit görüntüsü incelenmiştir. Buna göre S-1-1 numunesinde balistik test sonucu mermi ucundan itibaren 12 mm'lik bir penetrasyon gerçekleşmiştir. PMK tabaka tamamen delinmiştir. MMK tabakada ise 7 mm'lik bir penetrasyon oluşmuştur. Mermi giriş yüzeyi olan PMK'dan dışa doğru tabakalar halinde açılma gözlemlenmiştir. Arka yüzeyde bulunan MMK'nın arka yüzeyinde kabarma meydana gelirken herhangi bir kopma gözlemlenmemiştir.

S-1-2 numunesine ikinci düzey hızda gerçekleştirilen balistik testte mermi 656,2 m/s hızda fırlatılmıştır. Bu test sonucu numunenin kesit, ön ve arka yüzey görüntüleri Şekil 3.56'da verilmiştir. Aynı konfigürasyonda önceki hız düzeyinde delinmeyen eşdeğer numune hızın 656,2 m/s'ye çıkarılması ile tamamen delinmiştir. Şekil 3.56'da da görüleceği üzere PMK tabakadaki dışa doğru tabakalar halinde açılma hızın arttırılması ile daha da genişlemiştir. Buna ek olarak, arka taraftaki MMK numunede delinme sonucu dışa doğru kopmalar meydana gelmiştir. Şekil 3.57'de S-1-2 numunesinden mermi çıkışı anlık olarak alınmış kareler ile verilmiştir. Numuneden çıktıktan sonra merminin farklı zamanlarda konumunun belirlenmesi ile elde edilen hız ölçümüne göre mermi çıkış hızı (126,5+128,3+132,0)/3= 128,3 m/s olarak belirlenmiştir. Giriş hızının 656,2 m/s olduğu göz önüne alınacak olursa 656,2-128,3= 527,9 m/s'lik hızı azaltmış dolayısı ile mermi ağırlığının 2,9 gram olduğu hesaba katılarak yaklaşık $0,5\times0,0029\times527,9^2$= 404 Joule enerji absorbe ettiği tespit edilmiştir.

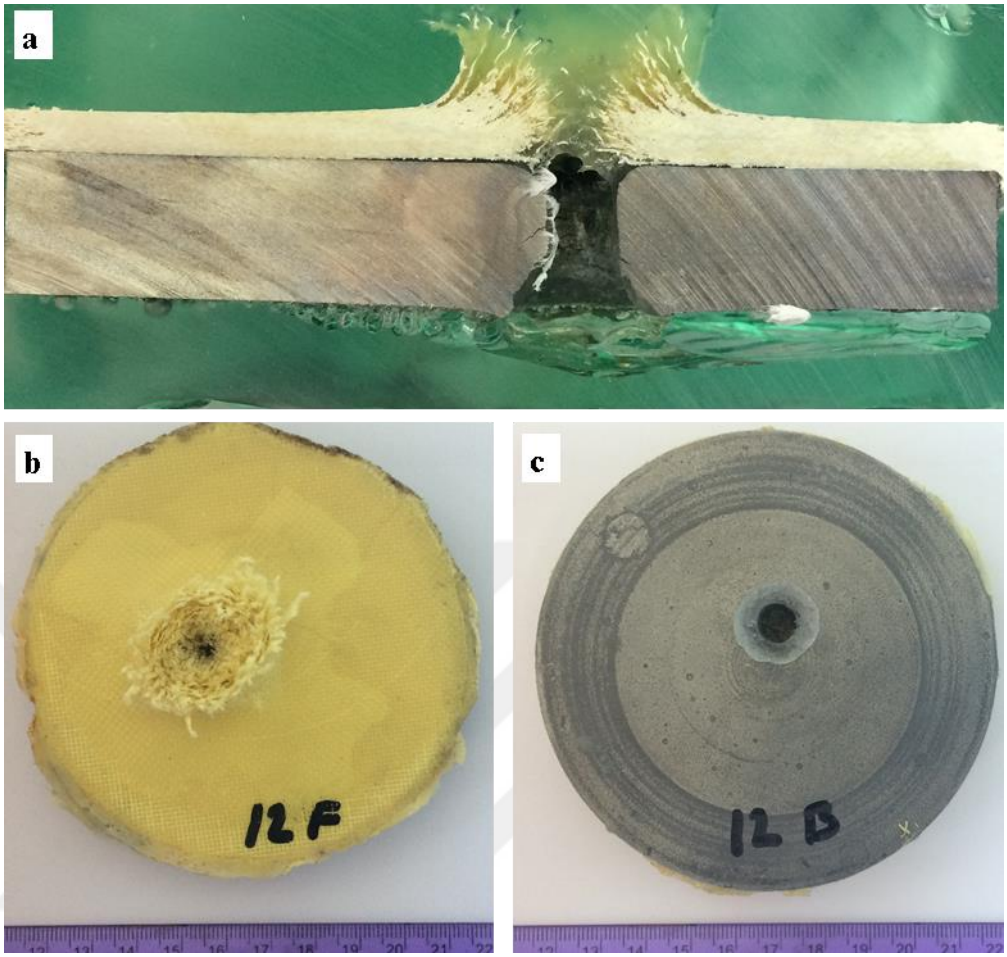


Şekil 3.56. S-1-2’nin kesit (a), ön (b) ve arka (c) görüntüleri.



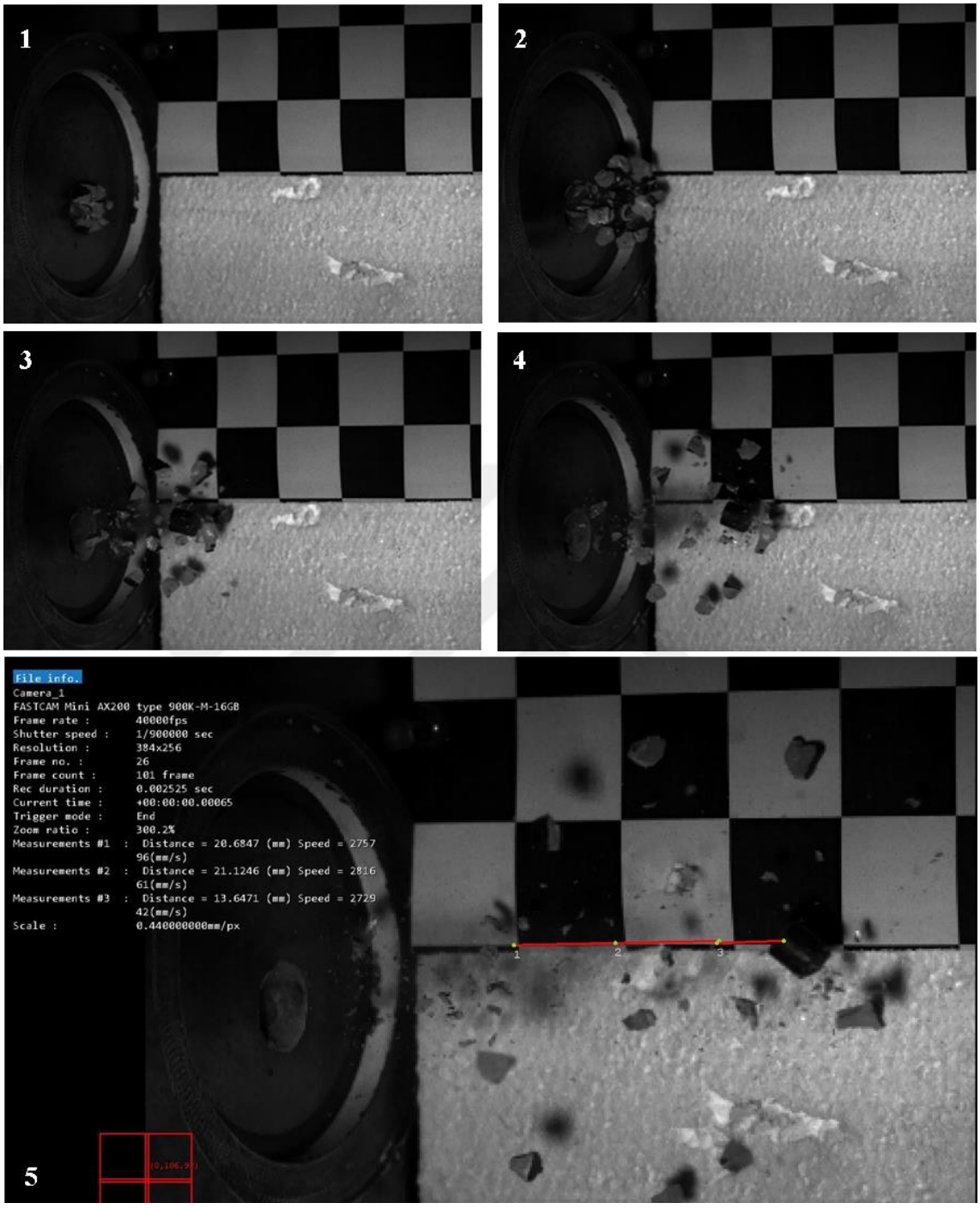
Şekil 3.57. S-1-2'nin arkasından atış esnasında alınmış sıralı görüntüler ve hız ölçümü.

3. hız düzeyi içerisinde olan 758 m/s ile gerçekleştirilmiş bir diğer atış birinci tip numunelerden biri olan S-1-3'tür. Bu numunenin test sonrası kesit ön ve arka görüntüsü Şekil 3.58'de sunulmuştur. Buna göre bir önceki hız düzeyinde de gerçekleştiği üzere numune tamamen delinmiştir. S-1-2 numunesine benzer bir hasar meydana gelmiştir.



Şekil 3.58. S-1-3'ün kesit (a), ön (b) ve arka (c) görüntüleri.

S-1-3 numunesinin delinmesi sonucu merminin yolunu ve hızının tespit edildiği görüntüler sıralı olarak Şekil 3.59'da verilmiştir. Buna göre mermi çıkış hızı (275,7+281,6+272,9)/3= 276,7 m/s olarak tespit edilmiştir. Giriş hızından çıkış hızının çıkarılması sonucu (758-276,7= 481,3 m/s) S-1-3 numunesinin mermi giriş hızından 481,3 m/s hız azalttığı dolayısıyla $0,5\times0,0029\times481,3^2$= 355,9 Joule enerji absorbe ettiği tespit edilmiştir. Aynı konfigürasyona sahip olmasına rağmen S-1-2 numunesinin absorbe ettiği enerjiden daha az enerji absorbe etmesi hızın artması ile numunenin enerji absorbe edebilme yeteneğini düştüğünü ortaya çıkartmıştır.



Şekil 3.59. S-1-3'ün arkasından atış esnasında alınmış sıralı görüntüler ve hız ölçümü.

3.3.2. İkinci Tip Numunelerin Balistik Davranışları

Balistik testlerin uygulandığı bir diğer numune tipi birinci tip numunenin hedefe ters konumlandırılması ile elde edilmiş olan, yani mermiye maruz kalan ön tarafın MMK

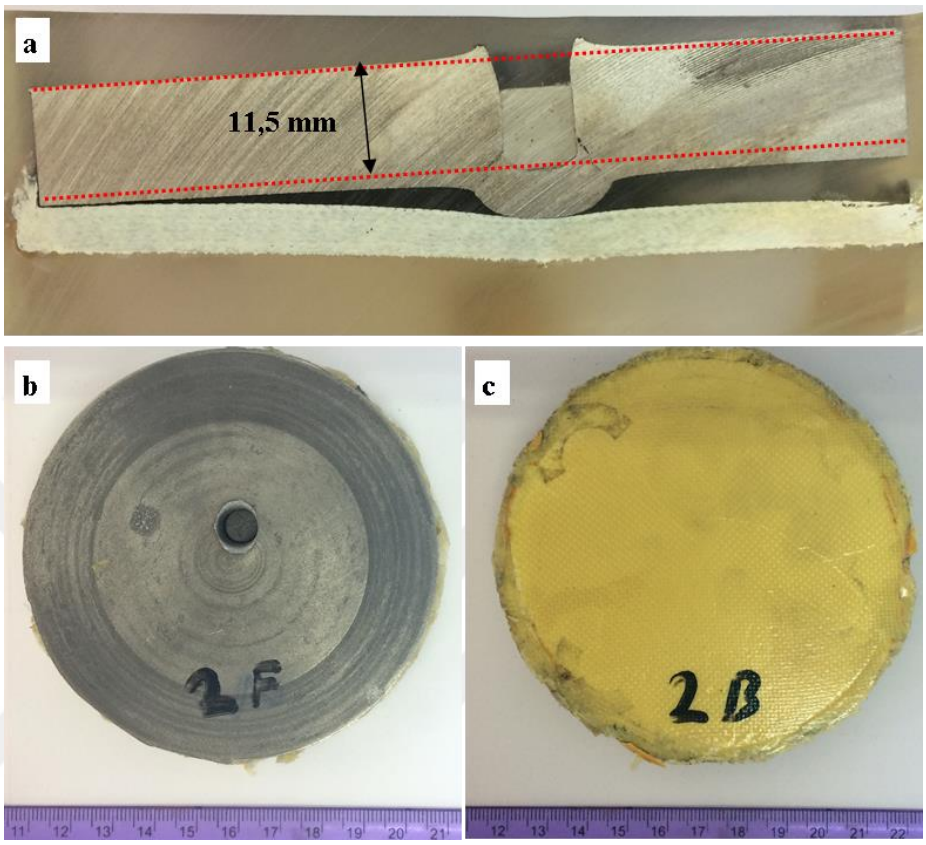
arka tarafın PMK olduğu numunelerdir. Numune geometrisi birinci tip numuneler ile tamamen aynı olacak şekilde üretilmiştir.

İkinci tip numuneler içerisinde birinci düzey hızda balistik teste tabi tutulan numune 613,6 m/s hızla atış yapılmış S-2-1'dir. Bu numuneye ait kesit, ön ve arka görüntüleri Şekil 3.60'ta verilmiştir. Bunun yanında numuneye atış sırasında numunenin arkasından peşi sıra çekilmiş 4 kare de sırası ile Şekil 3.61'de verilmiştir. S-2-1 numunesi bu hızda delinmemiştir. Ancak kesit görüntüsü incelendiğinde MMK'da 11,5 mm penetrasyon meydana getirdiği görülmektedir. Bu ölçümden ve şekilden de anlaşılacağı gibi PMK'da herhangi bir hasar oluşmamış ancak PMK'nın MMK'dan komple bir ayrılması söz konusudur. Mermiden gelen enerjinin bir kısmı MMK'nın bir miktar delinmesine harcanırken diğer kısım mermi ucundan sürüklenen MMK'ya ait parçaların PMK tarafından tutulması ve dolayısı ile PMK'nın MMK'dan ayrılması ile sonuçlanmasına yol açmıştır. Söz konusu testte mermi enerjisinin sandviç yapının tamamını delmeye yetmediği ve MMK da enerjinin büyük çoğunluğunu harcarken geri kalan enerjinin adeta bir esnek kumaş gibi mermiyi tuttuğu gözlemlenmektedir.

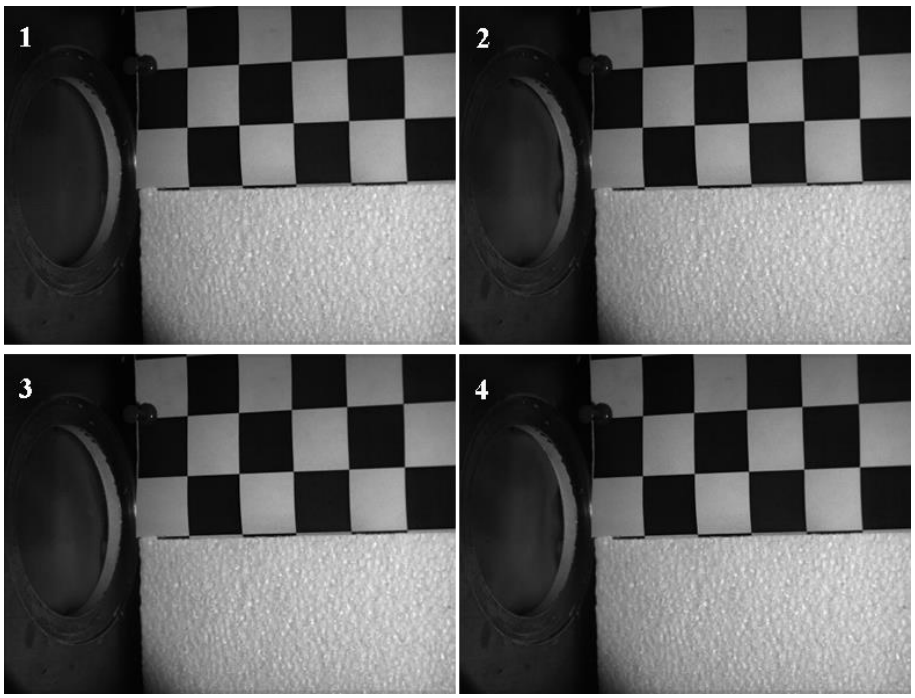
Aynı tip numuneye ikinci düzey hızda atışın gerçekleştirildiği numune S-2-2 dir. Bu numuneye atış 665,6 m/s hızda gerçekleştirilmiştir. Bu numuneye ait sonuç görselleri Şekil 3.62 ve Şekil 3.63'te verilmiştir. İkinci tip bu numuneye ikinci hızda yapılan bu test neticesin de de numunede herhangi bir delinme gözlemlenmemiş olup S-2-1 numunesine benzer bir şekilde numune hasar almıştır. PMK da herhangi bir delinme oluşmamıştır ve MMK tamamen delinmiştir. Sandviç yapının tamamında meydana gelen penetrasyon miktarı mermi ucundan itibaren 15 mm'dir. Bu testte, PMK şekil değiştirerek merminin enerjisini absorbe etmiş ve tutmuştur.

İkinci tip numuneye üçüncü düzey hız olarak 779,2 m/s hızında atış gerçekleştirilmiştir. Bu atışa maruz kalan S-2-3 numunesine ait kesit ön ve arka görüntüleri ile numune arkasından atış sırasında çekilmiş sıralı görüntüler Şekil 3.64 ve Şekil 3.65'te sunulmuştur. 779,2 m/s ile gerçekleştirilen bu atıştan da ikinci tip numunemiz olan S-2-3 başarı ile çıkmış ve delinme gerçekleşmemiştir. Önceki ikinci tip numuneler ile benzer şekilde hasar alıp mermiyi tutmuştur. MMK tamamen delinmiş ve sandviç yapıda 15,3 mm penetrasyon gerçekleşmiştir. Önceki numunelere benzer olarak

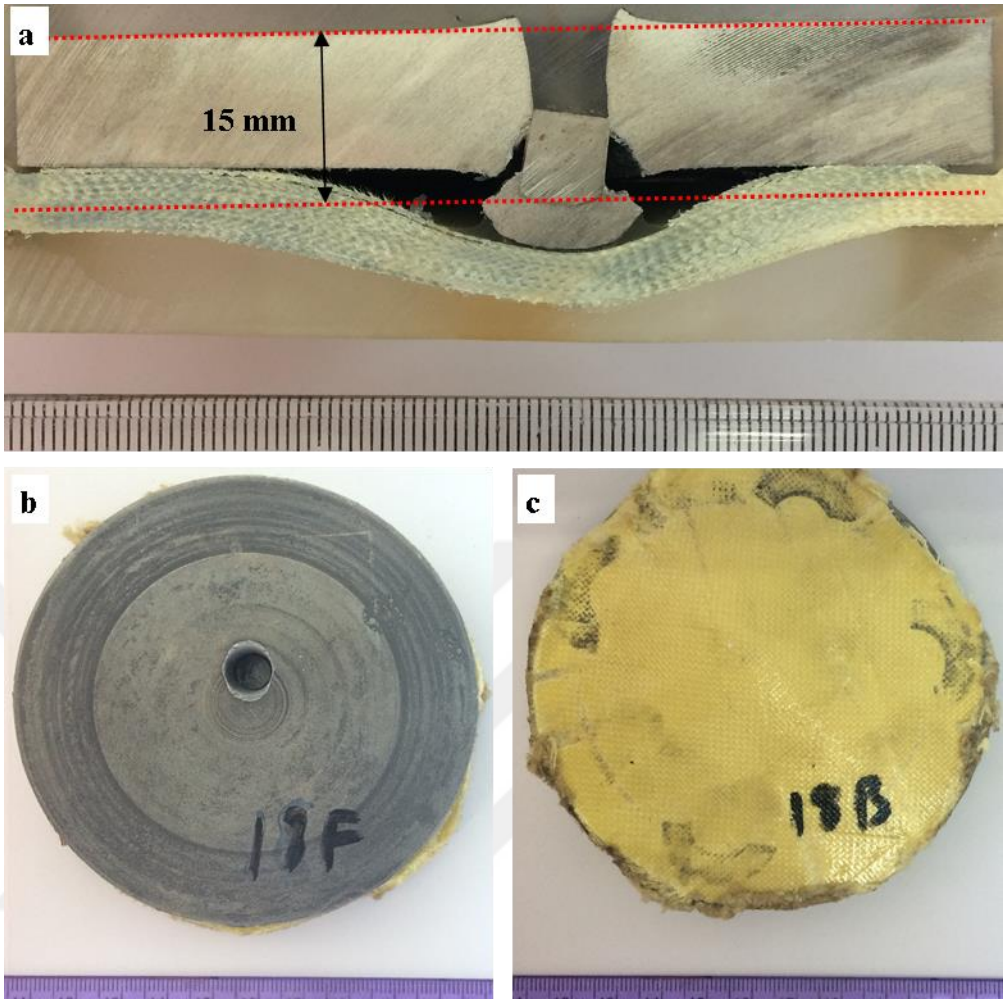
PMK'da herhangi bir delinme gerçekleşmemiştir. MMK'yı delerek yorulmuş mermi PMK'nın kısmen esnek davranması sonucu tutulmuştur.



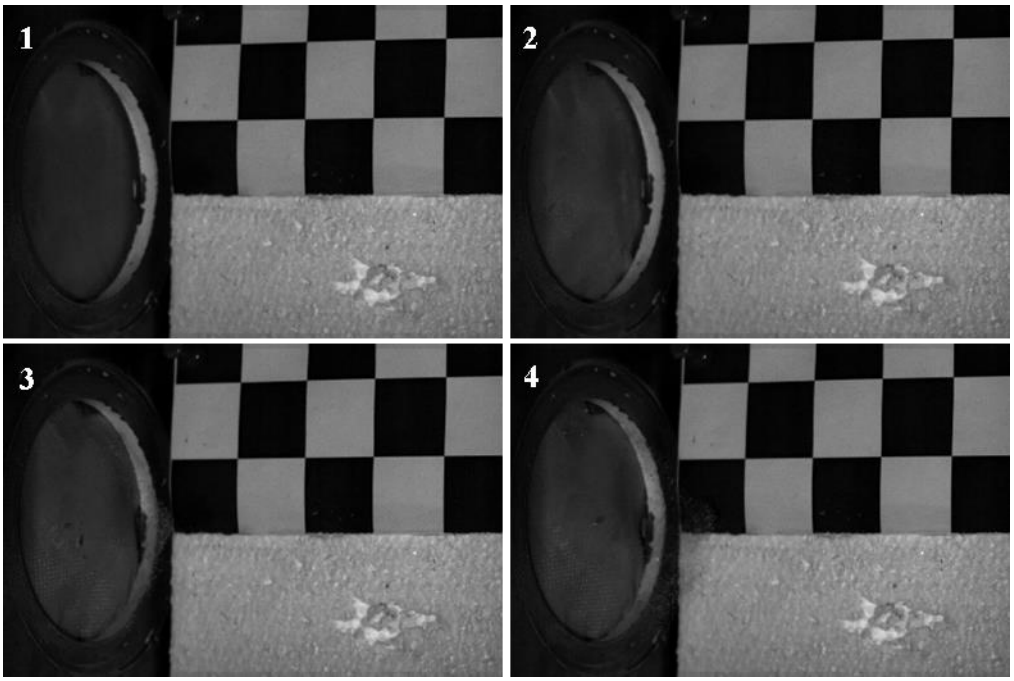
Şekil 3.60. S-2-1'in kesit (a), ön (b) ve arka (c) görüntüleri.



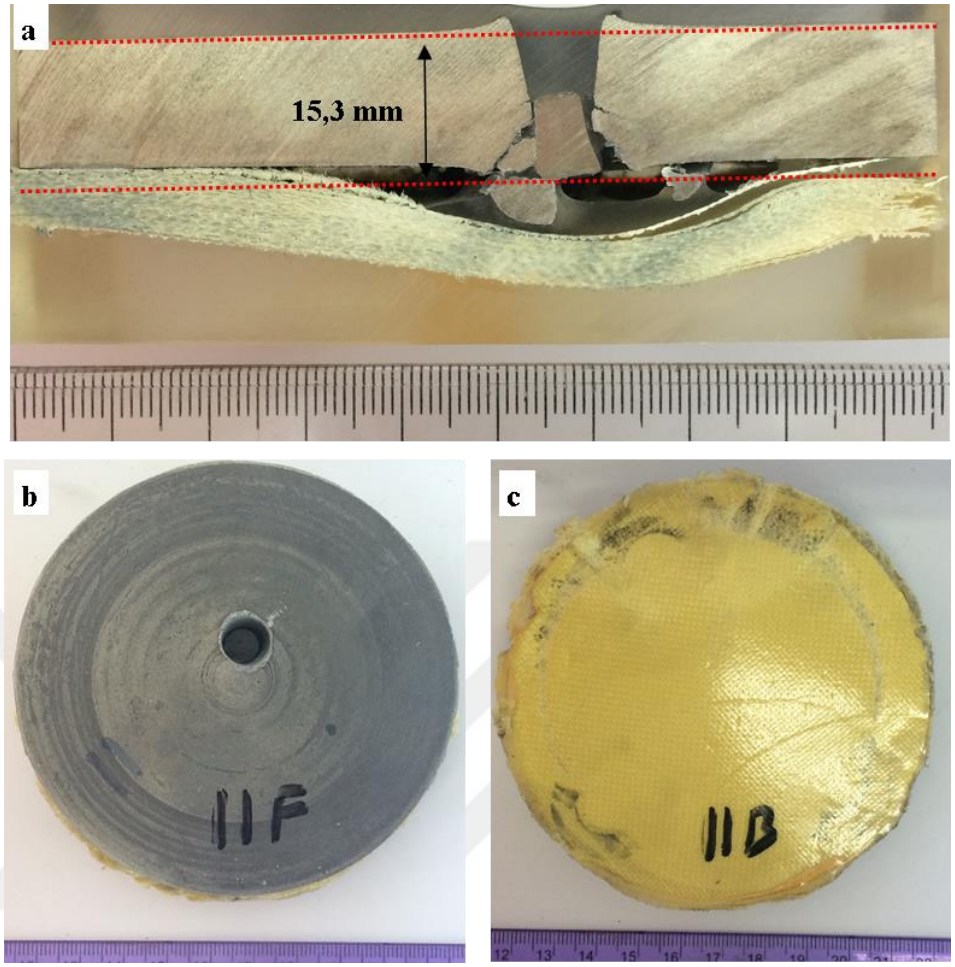
Şekil 3.61. S-2-1'in arkasından atış esnasında alınmış sıralı görüntüler.



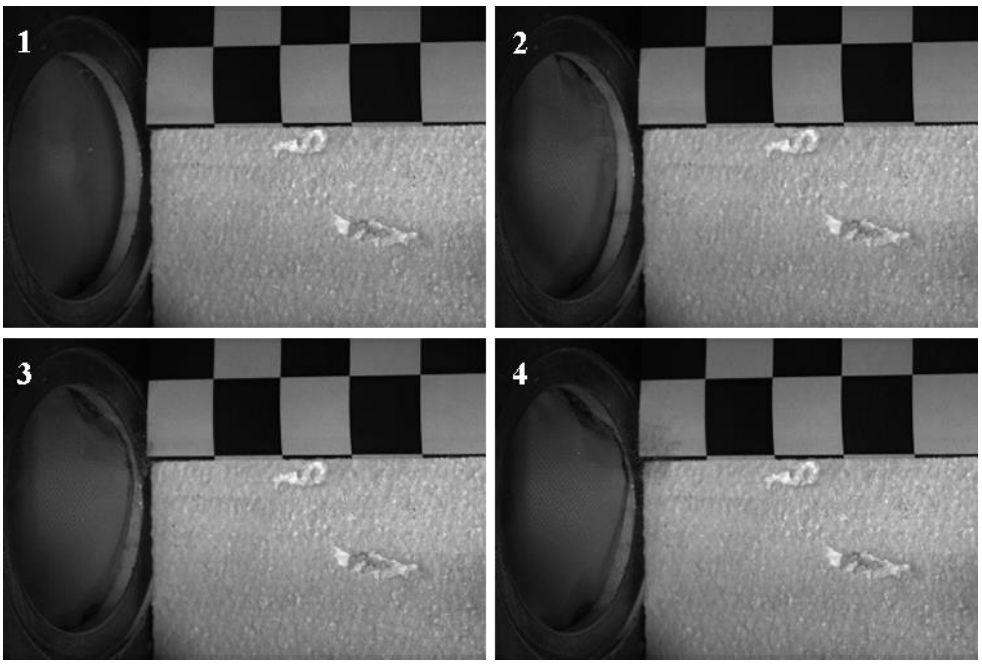
Şekil 3.62. S-2-2'nin kesit (a), ön (b) ve arka (c) görüntüleri.



Şekil 3.63. S-2-2'nin arkasından atış esnasında alınmış sıralı görüntüler.

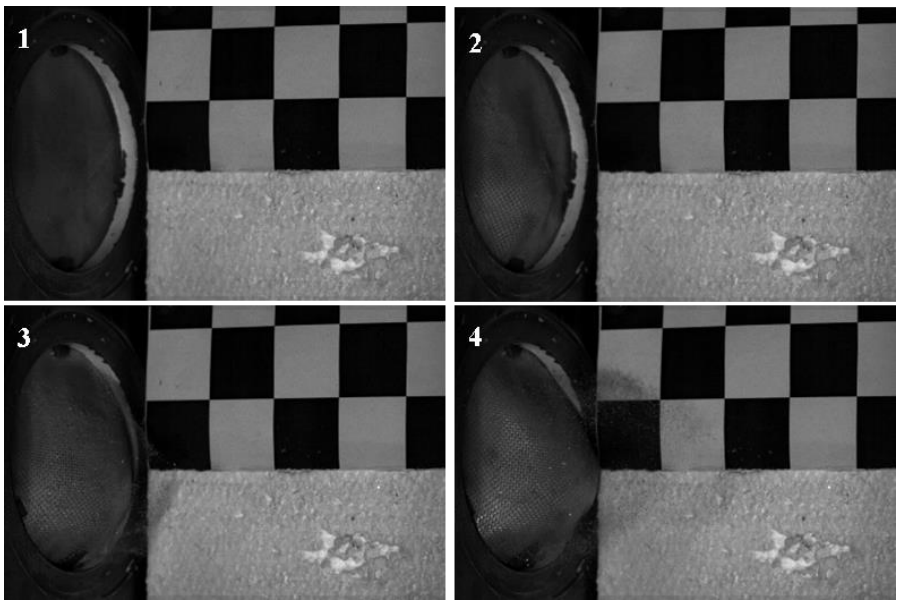


Şekil 3.64. S-2-3'ün kesit (a), ön (b) ve arka (c) görüntüleri.

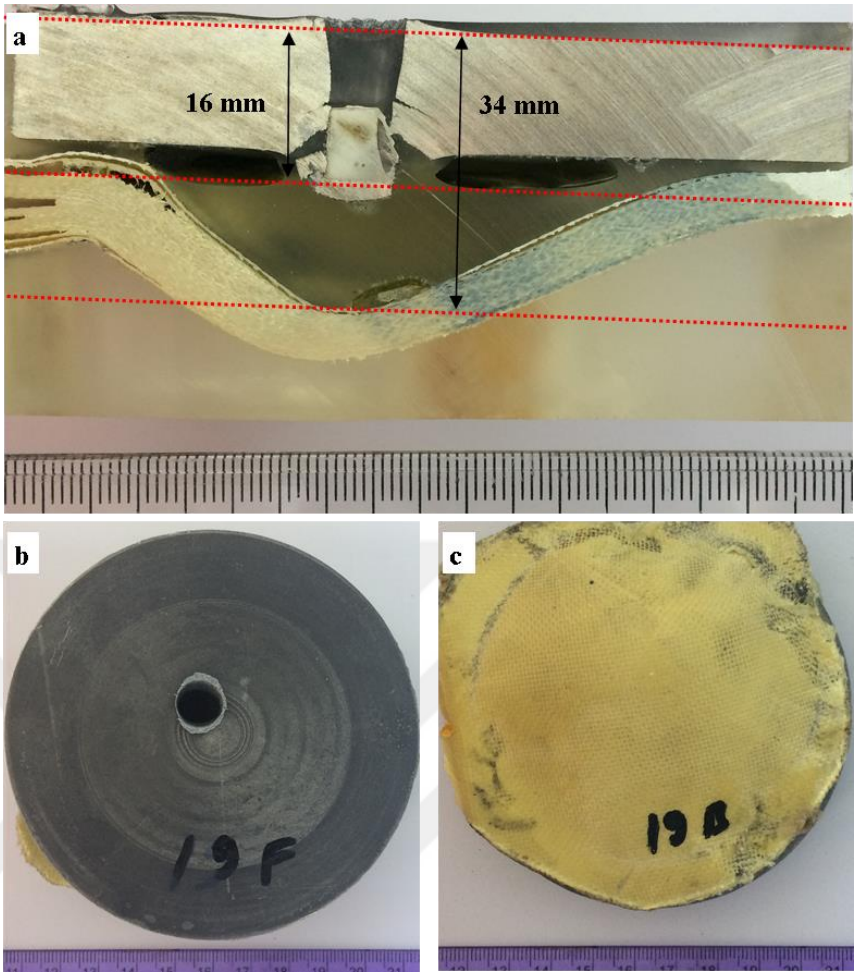


Şekil 3.65. S-2-3'ün arkasından atış esnasında alınmış sıralı görüntüler.

S-2-1, S-2-2 ve S-2-3 numunelerinin her üçünde de ön ve arka yüzeyler incelendiğinde numunelerin ön veya arka yüzeylerinde bir çatlama kırılma ve benzeri bir hasarın meydana gelmediği arka tarafların düzgün bir şekilde kabarıp kaldığı gözlemlenmiştir. Yapılan üç hız düzeyinde ki atışta da mermi tutulmuştur. Bölüm laboratuvar imkanları göz önüne alınarak yapılabilecek en yüksek hızdaki atış ikinci tip numune olan S-2-4 e gerçekleştirilmiştir. Bu atış 803,2 m/s hızda gerçekleştirmiştir. Bu hızda gerçekleştirilmiş S-2-4 numunesinin test sonrası kamera görüntüleri ve kesit, ön, arka Şekil 3.66 ve Şekil 3.67'de verilmiştir. Bu düzeyde yüksek hızda gerçekleştirilen atış neticesinde S-2-4 numunesi de delinmemiş ve bu tipteki önceki numunelere benzer davranış sergilemiştir. MMK tabaka tamamen delinmiş ve PMK tabaka önceki atışlarda olduğu gibi sünek davranıp mermiyi durdurmuştur. Mermi ucundan olan derinlik 16 mm olsa da bu sandviç yapıya PMK daki şişme diğer numunelere göre oldukça fazla olmuştur. Bu durum hem numunenin kesit görüntüsünden (Şekil 3.67) hem de atış sırasında kayıtta olan kamera görüntülerinde (Şekil 3.66) rahatlıkla gözlemlenebilmektedir. İkinci tip numunelerin delinmemesi ile elde edilen bu başarı prepreg ile kompozit elde edilirken daha az epoksinin kullanılması ve numunenin vakum infüzyon ve diğer üretim yöntemlerinde elde edilen PMK'lara kıyasla daha sünek bir yapıda olmasına bağlanabilir.



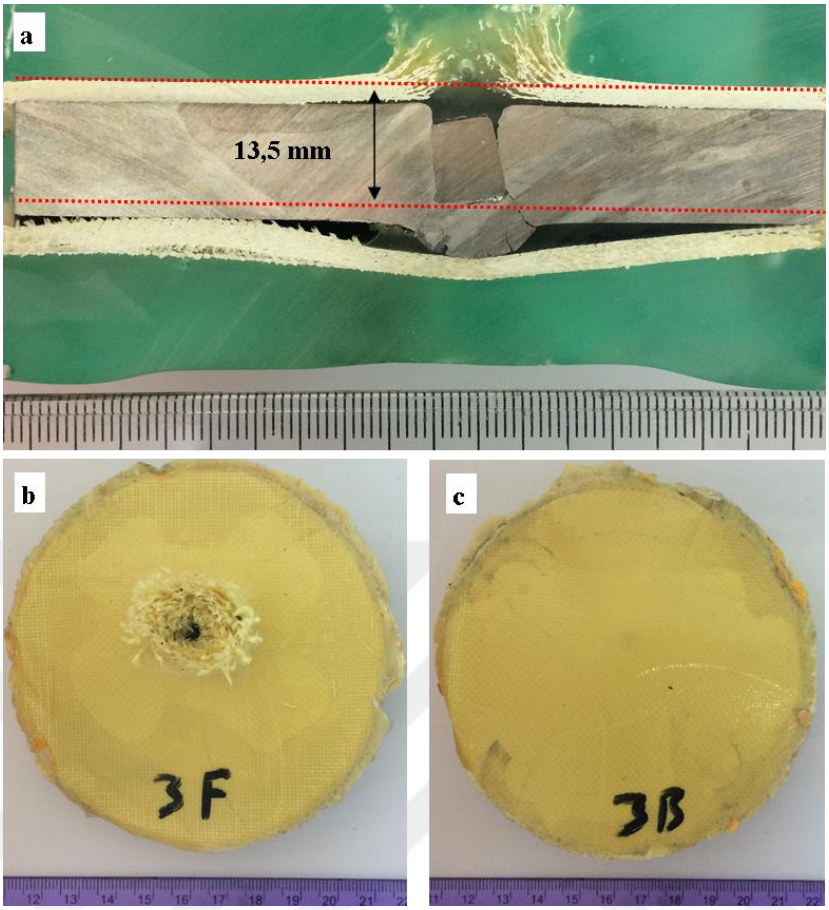
Şekil 3.66. S-2-4'ün arkasından atış esnasında alınmış sıralı görüntüler.



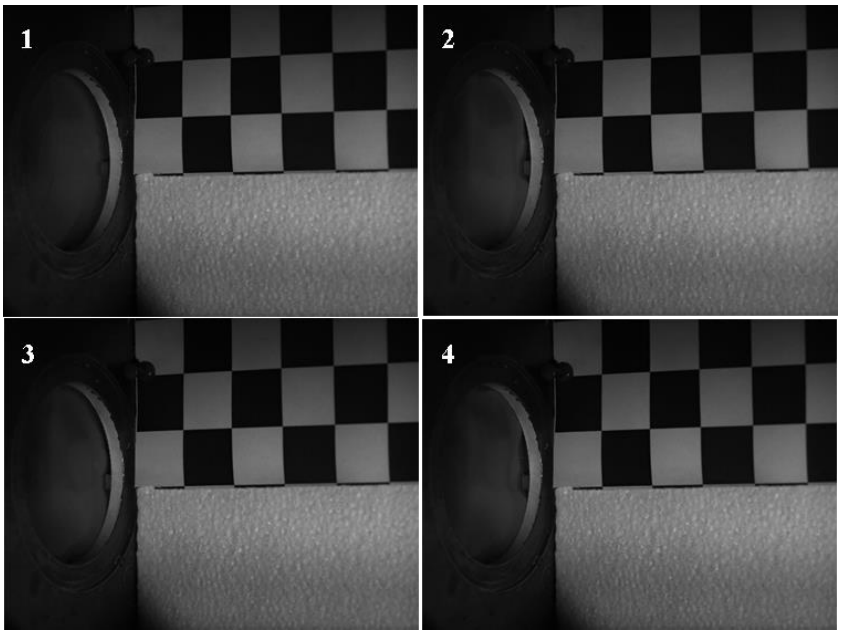
Şekil 3.67. S-2-4'ün kesit (a), ön (b) ve arka (c) görüntüleri.

3.3.3. Üçüncü Tip Numunelerin Balistik Davranışları

Bir diğer numune çeşidi olan üçüncü tip numuneler ortada MMK ön ve arka yüzeylerinde PMK'nın konumlandırıldığı numunelerdir. Bu numunelerde toplam kalınlık diğer tüm numuneler ile eşdeğer kalınlıkta olacak şekilde 18 mm olarak ayarlanmıştır. Bunun 13 mm'sini MMK yapı oluştururken ön ve arka yüzeylerde 2,5 mm kalınlığında olacak şekilde 10'ar katman prepregten meydana gelmiş PMK yapı bulunmaktadır. Üçüncü tip numunelere yine 3 farklı hız düzeyinde testler yapılmıştır. Bunlardan ilki S-3-1 numunesidir. S-3-1 numunesine balistik test esnasında 602 m/s hızda atış gerçekleştirilmiştir. Bu numuneye ait kesit ön ve arka görüntüsü ile birlikte atış sırasında kameradan alınmış 4 kare sırası ile Şekil 3.68 ve Şekil 3.69'da görülebilmektedir.



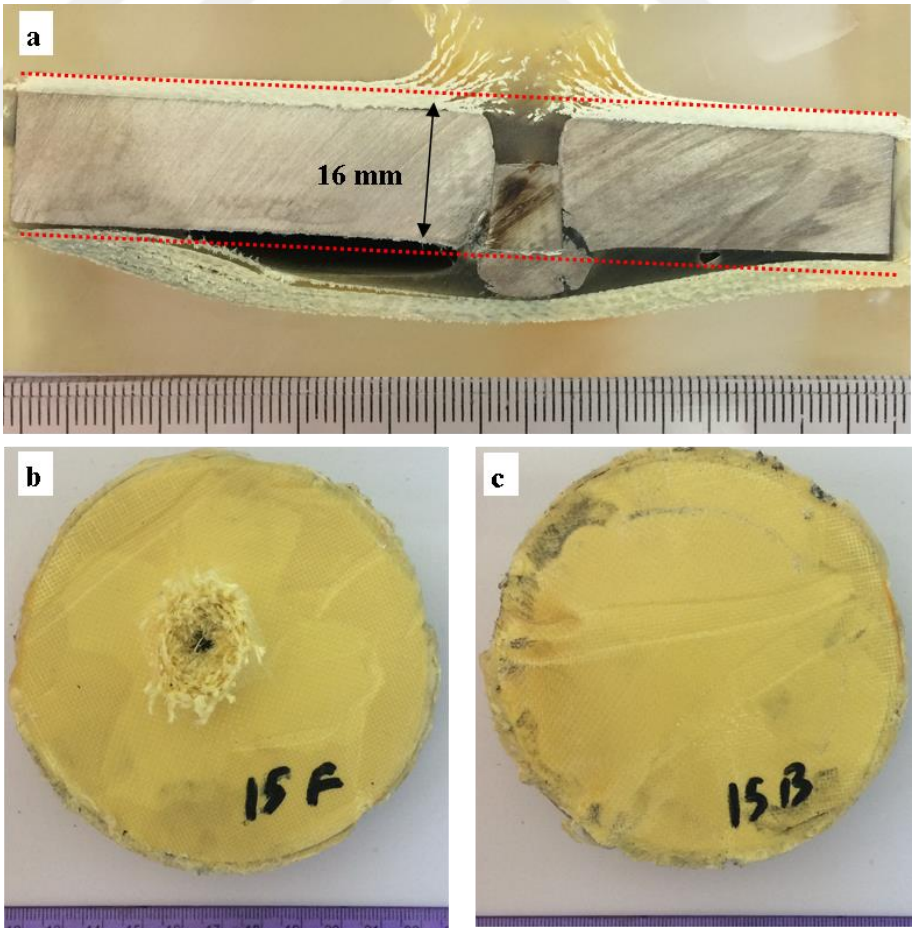
Şekil 3.68. S-3-1'in kesit (a), ön (b) ve arka (c) görüntüleri.



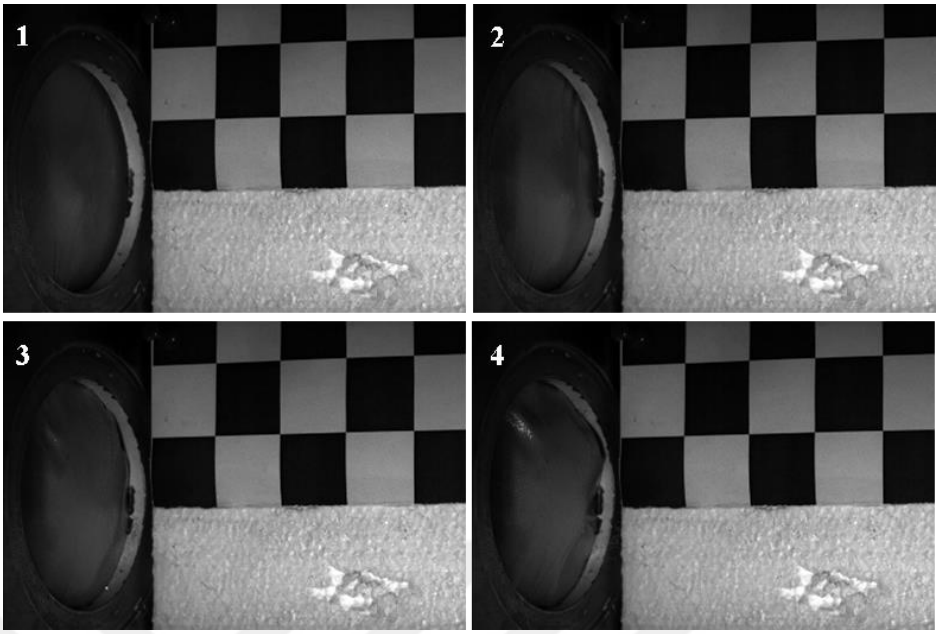
Şekil 3.69. S-3-1'in arkasından atış esnasında alınmış sıralı görüntüler.

S-3-1 numunesin test sonrası görüntüleri incelendiğinde ön taraftaki PMK'nın tamamının ve orta tabaka olan MMK'nın bir miktar delindiği arka tarafta bulunan PMK da bir delinme oluşmadığı gözlemlenmiştir. Sandviç yapıda oluşan toplam penetrasyon 13,5 mm olarak gerçekleşmiştir. Ayrıca alt taraftaki PMK'nın MMK'dan kısmi olarak ayrıldığı da tespit edilmiştir.

Aynı numune tipine ikinci hız düzeyinde gerçekleştirilen atışın yapıldığı numune S-3-2 dir. Bu numuneye 665,5 m/s hızında atış gerçekleştirilmiştir. Bu sandviç yapıda da bir delinme söz konusu değil ancak Şekil 3.70 ve Şekil 3.71'de de görüleceği üzere Ön taraftaki PMK tabaka ve orta kısımda bulunan MMK tabaka tamamen delinmiştir. Sandviç yapıdaki toplam penetrasyon 16 mm dir. Arka taraftaki PMK tabakada bir delinme görünmemekle birlikte MMK yapıdan önceki numuneye göre daha fazla miktarda bir ayrılma gözlemlenmiştir. Hız arttıkça mermiye ilk maruz kalan PMK yapıdaki dışa doğru ayrılma da artmıştır.

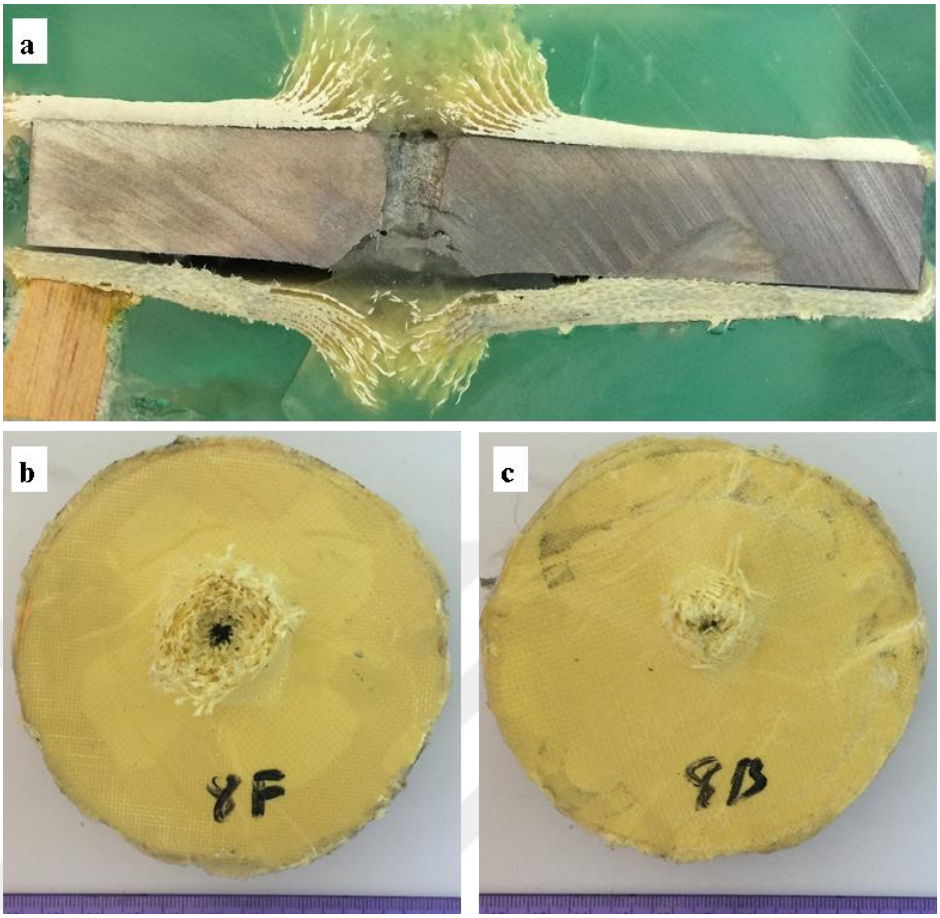


Şekil 3.70. S-3-2'in kesit (a), ön (b) ve arka (c) görüntüleri.

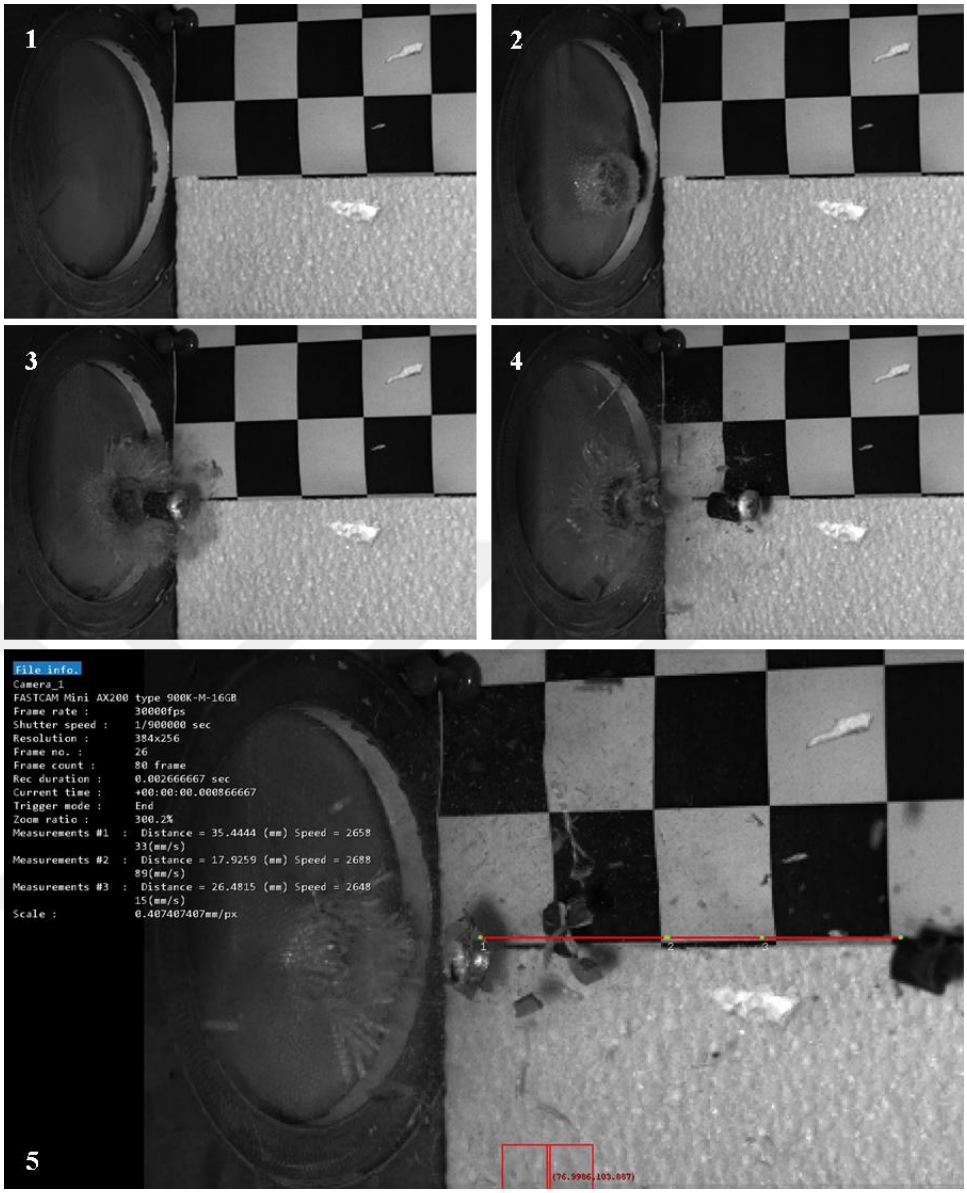


Şekil 3.71. S-3-2'nin arkasından atış esnasında alınmış sıralı görüntüler.

Üçüncü tip numune de son olarak gerçekleştirilen atış üçüncü hız düzeyinde olan 775,4 m/s ile gerçekleştirilmiş ve S-3-3 numunesine uygulanmıştır. Bu numuneye kesit ön ve arka yüzeyler Şekil 3.72'de verilirken atış sırasında kayda alınmış olan numune arkasındaki mermi yolunu gösteren kareler ve hız ölçümü Şekil 3.73'te sunulmuştur. Buna göre sandviç yapı tamamen delinmiştir. Merminin numuneden çıkış hızı (265,8+268,8+264,8)/3= 266,5 m/s olarak ölçülmüştür. Mermi atış hızının 775,4 m/s olduğu göz önüne alınacak olursa 775,4-266,5= 508,9 m/s hız S-3-3 tarafından tutulmuştur. Dolayısıyla, bu numunenin $0,5\times0,0029\times508,9^2$= 375,5 joule enerji absorbe ettiği söylenebilir.



Şekil 3.72. S-3-3'ün kesit (a), ön (b) ve arka (c) görüntüleri.



Şekil 3.73. S-3-3'ün arkasından atış esnasında alınmış sıralı görüntüler ve hız ölçümü.

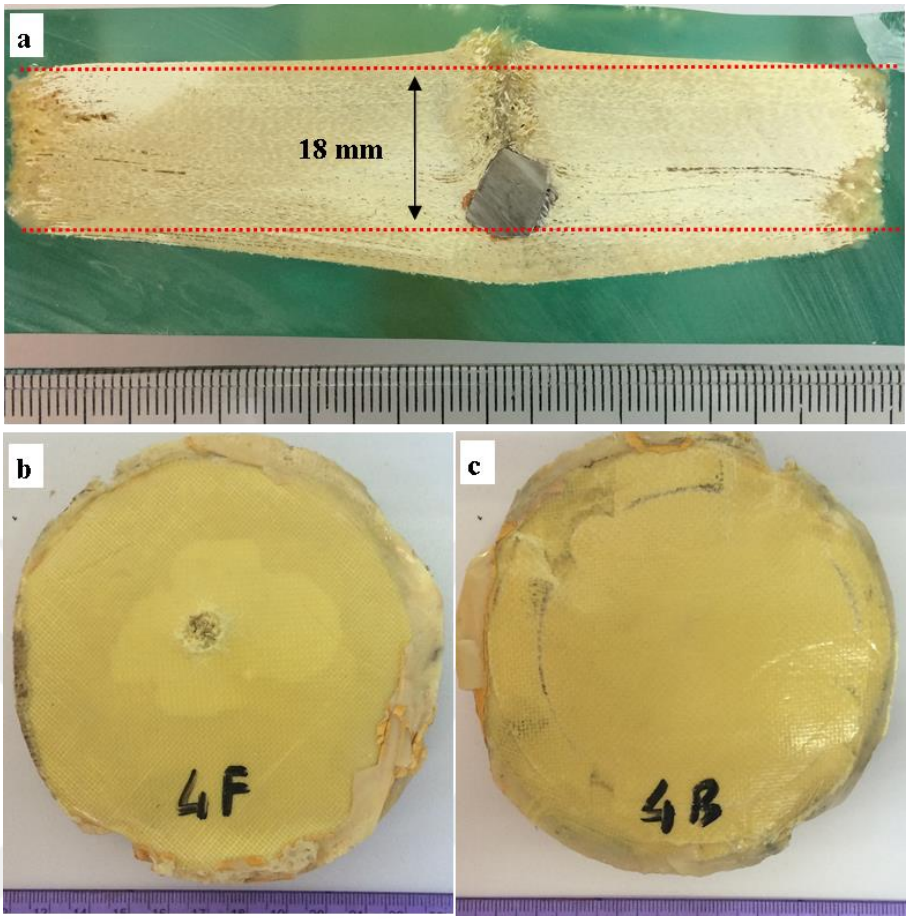
3.3.4. Dördüncü Tip Numunelerin Balistik Davranışları

Bu numune tipi tamamen PMK'dan meydana gelmektedir, yani herhangi bir MMK katmana sahip değildir. Toplam 72 katman prepregten 18 mm kalınlığında olacak şekilde 90 mm çapında üretilmiştir. Bu numuneye de öncekilere benzer olarak üç farklı hız düzeyinde balistik testler yapılmıştır. Bunlardan ilki S-4-1 numunesine 587,5 m/s hızında mermi atışı ile gerçekleştirilmiştir. S-4-1 numunesine ait kesit ön ve arka yüzey görüntüleri Şekil 3.74'te verilmiştir. Şekil 3.74'e bakıldığında numunede bu hız düzeyinde gerçekleştirilen atış sonucu bir delinme gerçekleşmemiş ancak numunenin

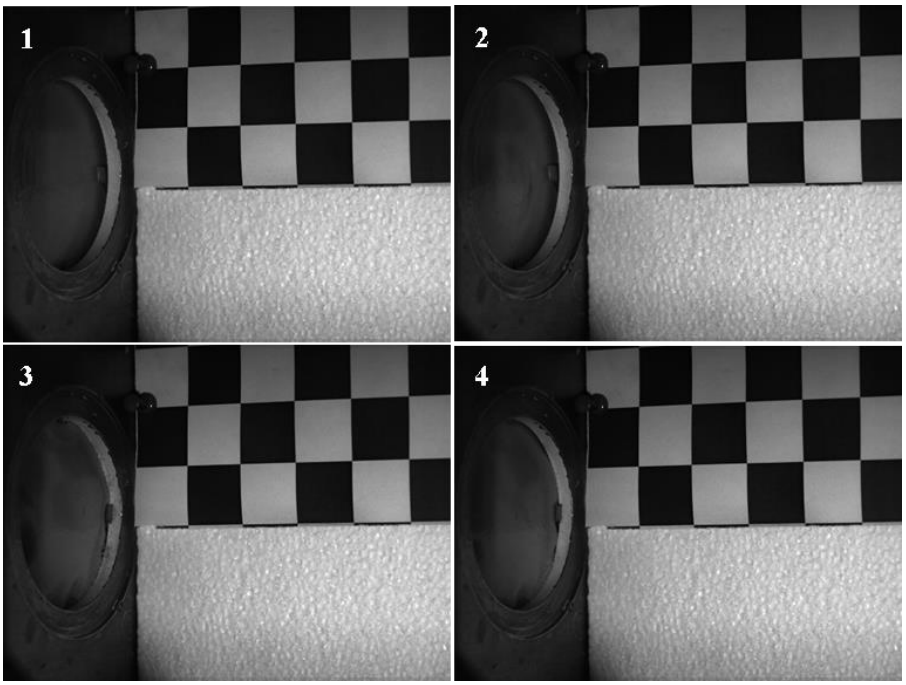
kalınlığına eşdeğer bir penetrasyon gerçekleşmiştir. 18 mm kalınlığındaki numune esneme ve şişme neticesinde 18mm'lik bir penetrasyonla delinmeden direnç sergilemiştir. Tamamı PMK'dan oluşturulmuş bu yapı incelendiğinde mermi ile karşılaşan PMK yapıdaki dışa doğru açılmanın önceki numunelere göre çok az olduğu tespit edilmiştir. Önceki numunelerde PMK yapıyı deldikten sonra MMK yapı ile karşılaşan mermi geriye doğru şok dalgaları yayması sebebi ile mermiye maruz kalan PMK yapıda dışa doğru bir açılma gerçekleşmiştir. Bu numunenin tamamı PMK olduğu için geriye doğru yansıyan dalgaların oldukça azaldığı bu açılmadaki azalmadan yola çıkılarak söylenebilir. S-4-1 numunesinin arkasından alınmış sıralı görüntüler Şekil 3. 75'te sunulmuştur.

Dördüncü tip numune için gerçekleştirilen ikinci hız düzeyindeki test S-4-2 numunesine 661,3 m/s hızda mermi fırlatılması ile gerçekleştirilmiştir. Bu numuneye ait kesit, ön ve arka görüntü Şekil 3.76'da verilmiştir. Buna göre S-4-2 numunesi tamamen delinmiştir. Kamera ile alınan mermi yolunu gösteren sıralı görüntüler ve hız ölçümü Şekil 4.77'de sunulmuştur. Buradan yola çıkarak merminin S-4-2 numunesinden çıkış hızı (234,6+228,0+240,0)/3= 234,2 m/s dir. Dolayısı ile mermi fırlatış hızı ile birlikte bakıldığında 661,3-234,2= 427,1 m/s hızı S-4-2 numunesi tutmuştur. Bir başka ifade ile $0,5\times0,0029\times427,1^2$= 264,5 joule enerji absorbe etmiştir. Bunlara ek olarak, numune kesiti incelendiğinde mermi çıkış bölgesine doğru tabakalarda ayrılmanın başlanmış olduğu tespit edilmiştir.

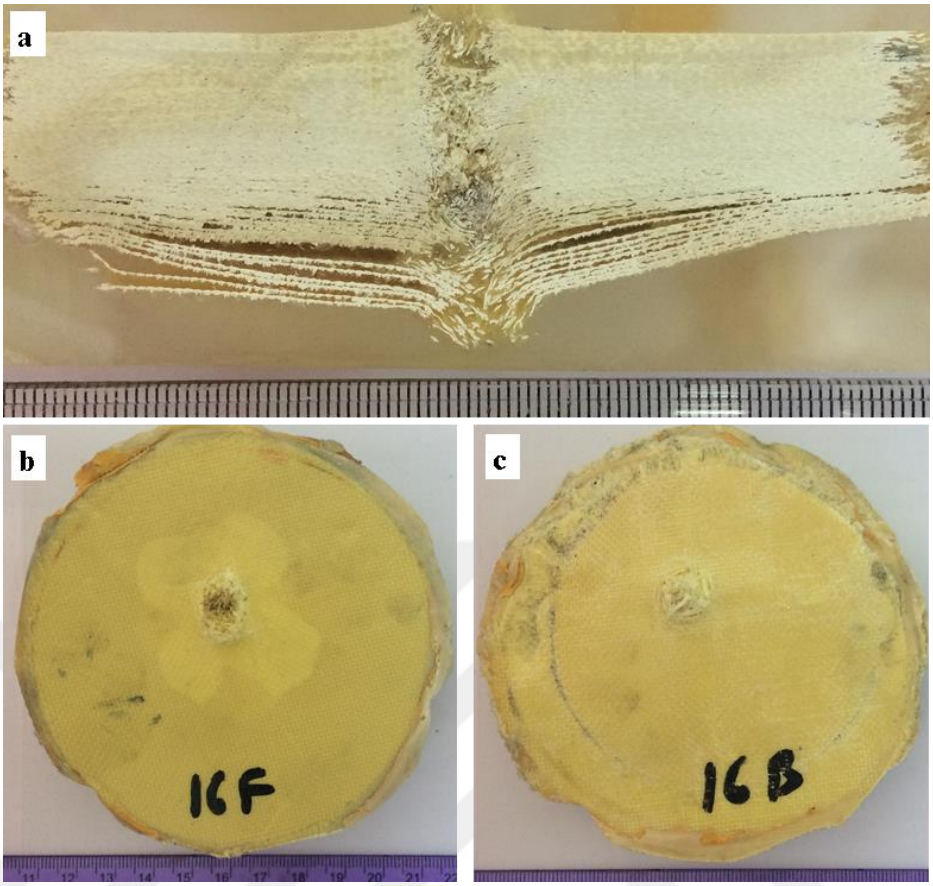
Dördüncü tip numuneler de gerçekleştirilen son test S-4-3 numunesine uygulanmıştır. Bu testte üçüncü hız düzeyi sınırlarında olan 755,1 m/s hızında mermi ile test gerçekleştirilmiştir. Numunenin kesit, ön ve arka görüntüleri ile atış sonrası mermi yolu ve hız ölçümünün yapıldığı görüntüler sırası ile Şekil 3.78 ve Şekil 3.79'da verilmiştir.



Şekil 3.74. S-4-1'in kesit (a), ön (b) ve arka (c) görüntüleri.

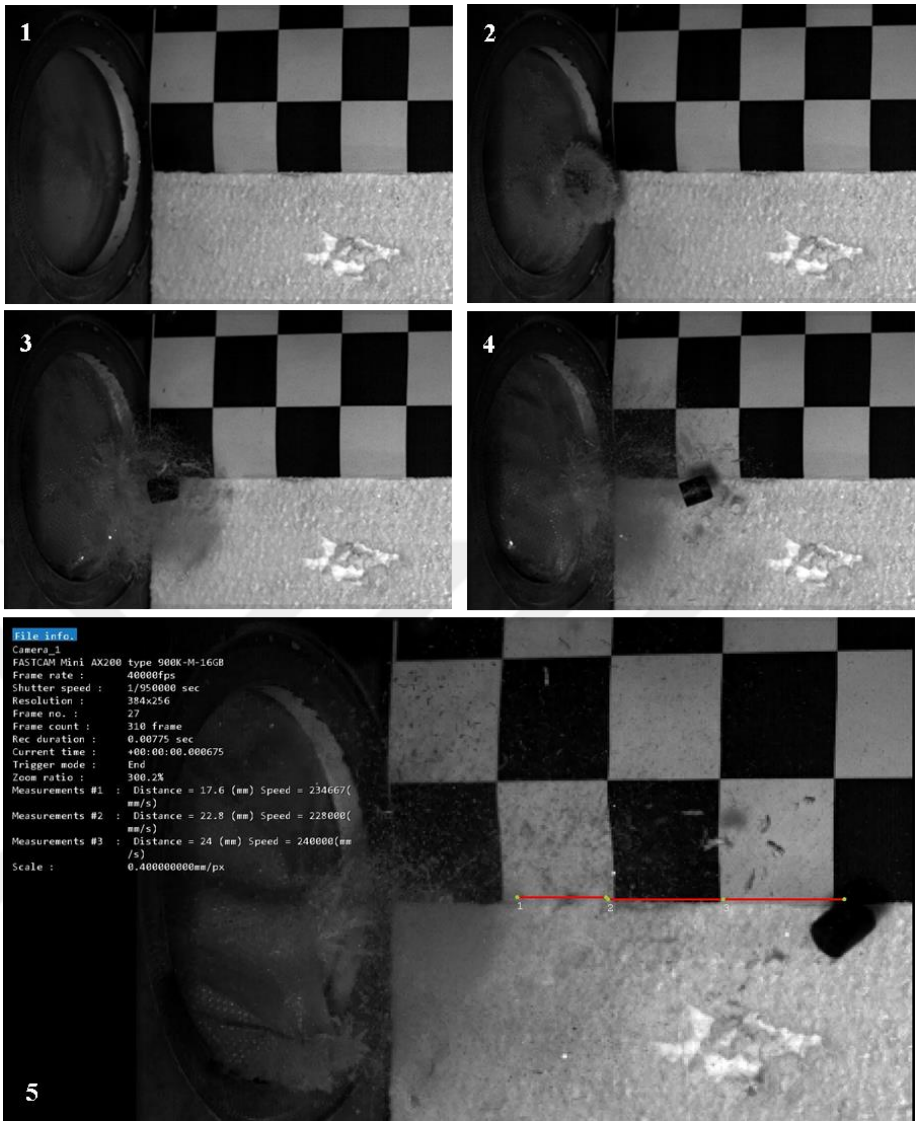


Şekil 3.75. S-4-1'ün arkasından atış esnasında alınmış sıralı görüntüler.

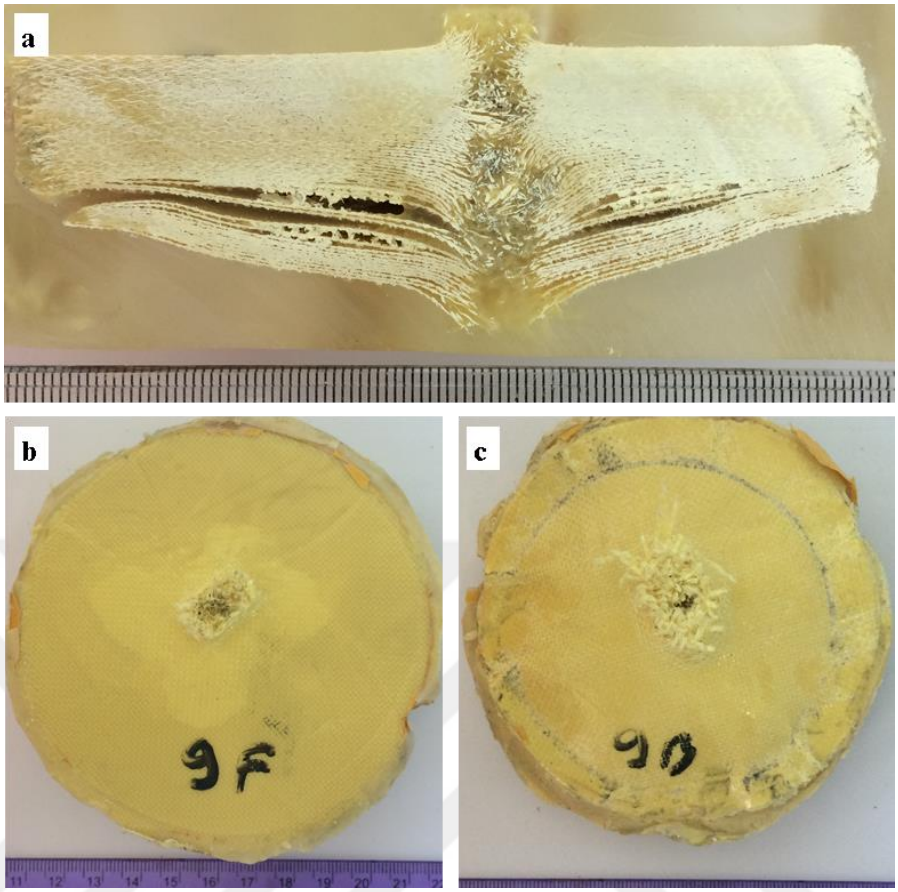


Şekil 3.76. S-4-2'nin kesit (a), ön (b) ve arka (c) görüntüleri.

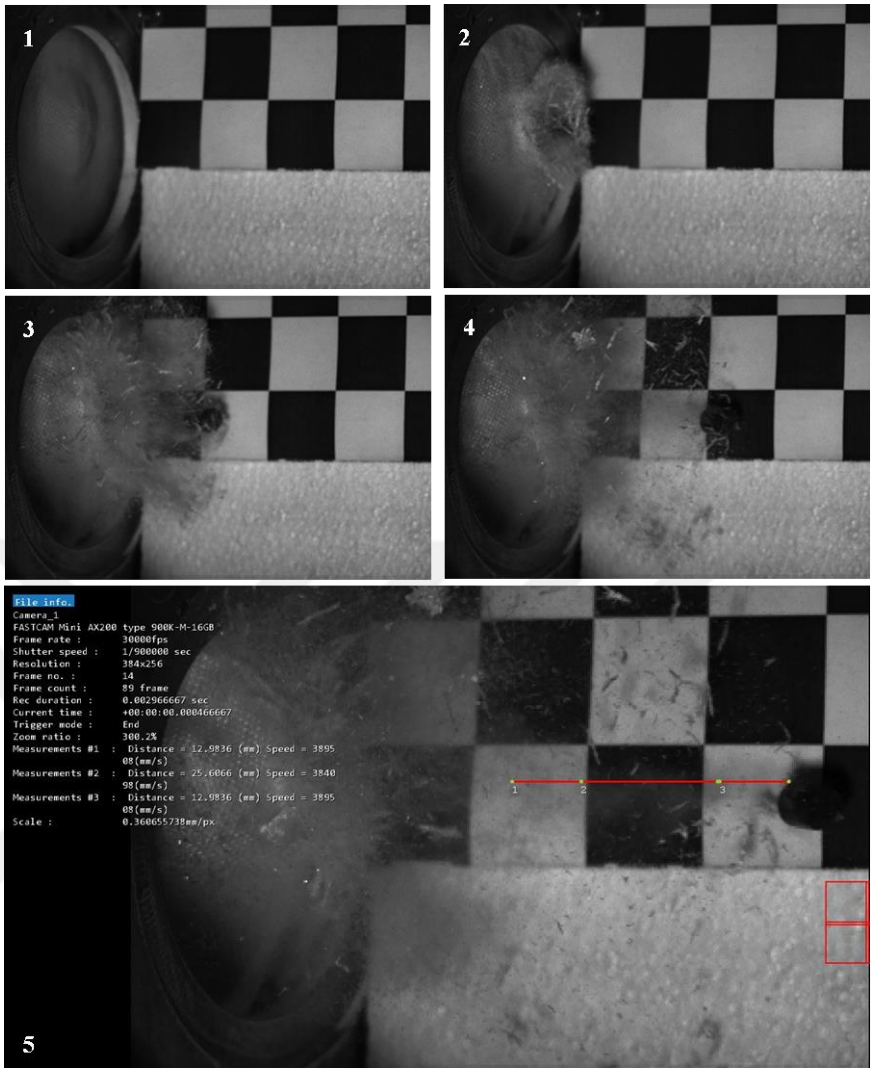
Buna göre S-4-3 numunesinden merminin çıkış hızı (389,5+384,0+389,5)/3= 387,7 m/s olarak tespit edilmiştir. Merminin numuneye giriş hızından çıkış hızı çıkarıldığında (755,1-387,7= 367,4 m/s) S-4-3 numunesinin 367,4 m/s hızı ve buna bağlı olarak da $0,5\times0,0029\times367,4^2$= 195,7 joule enerji absorbe ettiği tespit edilmiştir. Bu absorbe edilen enerji miktarı diğer numuneler ile kıyaslandığında oldukça düşük kalmaktadır. Bu sonuçlar 3.3.6 bölümünde detaylı bir şekilde tartışılacaktır. S-4-3 numunesine yapılan balistik test sonucu mermi çıkış bölgesine yakın kısımlarda tabaka ayrılması tespit edilmiştir. Bu durum önceki numunelerde de gözlemlenmişti ancak, dikkatli incelendiğinde ayrılma miktarının mermi atış hızı ile parelel olarak oldukça belirginleştiği görülebilmektedir. S-4-1 ve S-4-2 numunesine benzer şekilde mermi giriş bölgesinde dışa doğru açılmaların MMK'lı yapılara oranla oldukça az olduğu bu test sonucunda da görülmüştür. Bunun yanında, dördüncü tip numunelerde hız arttıkça bu dışa doğru açılmanın az da olsa arttığı ve bu da darbe ile oluşan ve geri yayılan gerilim dalgalarının arttığına işaret etmektedir.



Şekil 3.77. S-4-2'in arkasından atış esnasında alınmış sıralı görüntüler ve hız ölçümü.



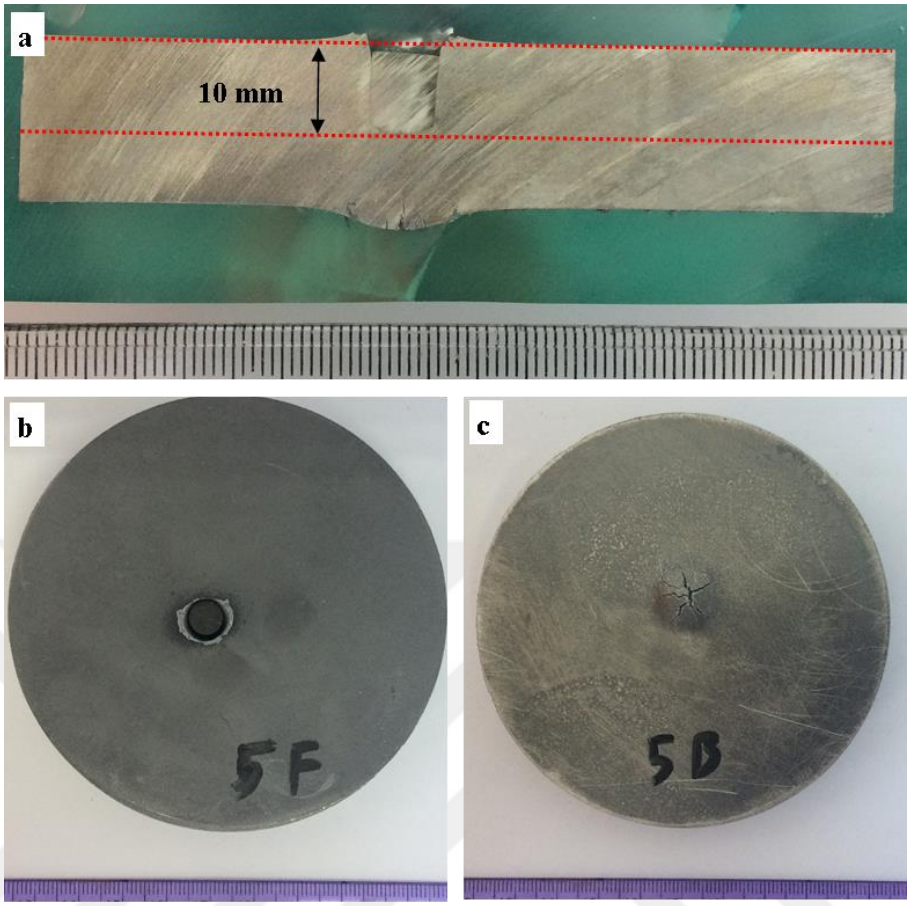
Şekil 3.78. S-4-3'ün kesit (a), ön (b) ve arka (c) görüntüleri.



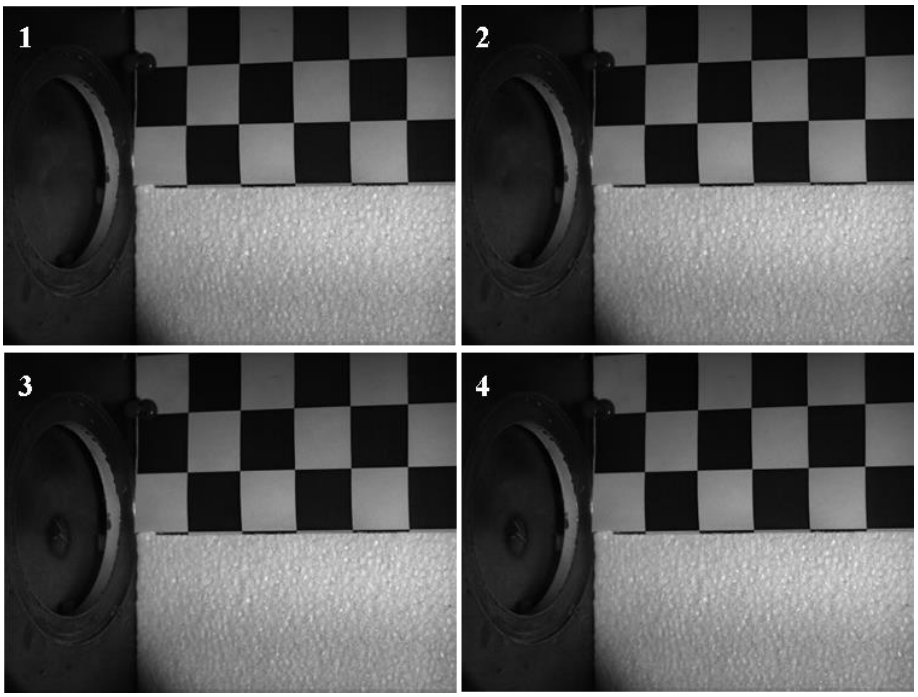
Şekil 3.79. S-4-3'ün arkasından atış esnasında alınmış sıralı görüntüler ve hız ölçümü.

3.3.5. Beşinci Tip Numunelerin Balistik Davranışları

Numune tiplerinin sonuncusu olan beşinci tip numune diğer tip numuneler ile eşdeğer yani 18 mm kalınlığında sadece MMK'dan meydana gelmektedir. 90 mm çapında ve hacimce %20 oranında SiC içeren Al6061 matrisli metal matrisli kompozittir. Tek parça halinde toz metallurjisi yöntemi ile üretilmiş bu tip numuneye de üç farklı hız düzeyinde balistik testler yapılmıştır. Bunlardan ilki olan S-5-1 numunesine 588,4 m/s hızında mermi atışı ile gerçekleştirilmiştir. Bu numuneye ait balistik test sonuçlarını gösteren görseller Şekil 3.80 ve Şekil 3.81'de yer almaktadır. Bu görsellerden yola çıkılarak yapılan incelemeler neticesinde S-5-1 numunesinin tamamen delinmediği buna karşın 10 mm'lik bir penetrasyon meydana geldiği anlaşılmaktadır.



Şekil 3.80. S-5-1'ün kesit (a), ön (b) ve arka (c) görüntüleri.



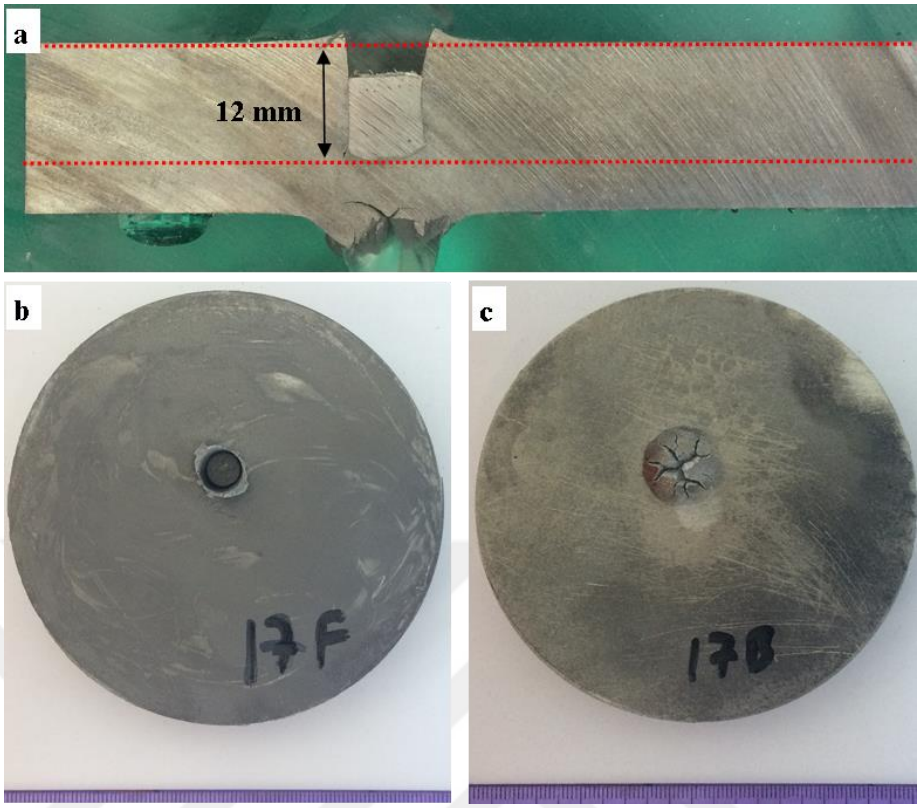
Şekil 3.81. S-5-1'in arkasından atış esnasında alınmış sıralı görüntüler.

Numunenin mermiye maruz kalan ön yüzeyinde mermi giriş bölgesi etrafında bir taç yaprağı şeklinde açılma söz konusu iken arka tarafında bir kopma ve parçalanmanın olmaması ve numune genelinde bir çatlak veya kırılma görülmemesi numunenin istenilen süneklikte üretildiğini kanıtlamaktadır.

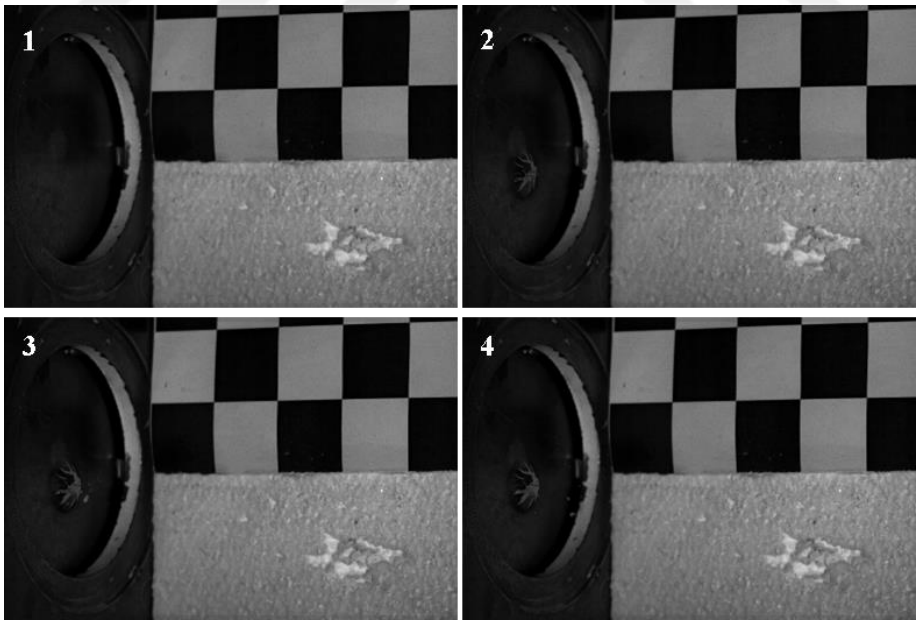
Bu tip numunede gerçekleştirilen ikinci hız düzeyindeki atış S-5-2 numunesine 654,2 m/s hızında gerçekleştirilmiştir. Bu numuneye ait sonuçları gösteren numune kesit, ön ve arka görüntüleri ve numune arkasından atış esnasında çekilmiş sıralı görüntüler Şekil 3.82 ve Şekil 3.83'te verilmiştir. Bu sonuçlara bakıldığında S-5-2 numunesinin ikinci hız düzeyinde gerçekleştirilen atış sonucu tamamen delinmediği anlaşılmaktadır. Bu test sonucu numunede gerçekleşen penetrasyon miktarı 12 mm olarak gerçekleşmiştir. Teste ait görsellere dikkatli bakıldığında artan hızdan kaynaklandığı düşünülen S-5-1 numunesine göre numune arkasından daha fazla oranda şişme ve çatlaklık saptanmıştır. Ayrıca mermi giriş bölgesindeki açılmada nispeten daha fazla olmuştur.

Beşinci tip numunede son olarak gerçekleştirilen test üçüncü hız düzeyinde olan ve 766,2 m/s mermi hızı ile S-5-3 numunesine gerçekleştirilen atıştır. Bu numuneye ait kesit, ön ve arka görüntüler Şekil 3.84'te sunulmuştur. Bu hız düzeyinde gerçekleştirilen atış sonucunda S-5-3 numunesi tamamen delinmiştir. Buna ilaveten, delinme ile birlikte numune arkasından bir miktar kopma gerçekleştiği görülebilmektedir.

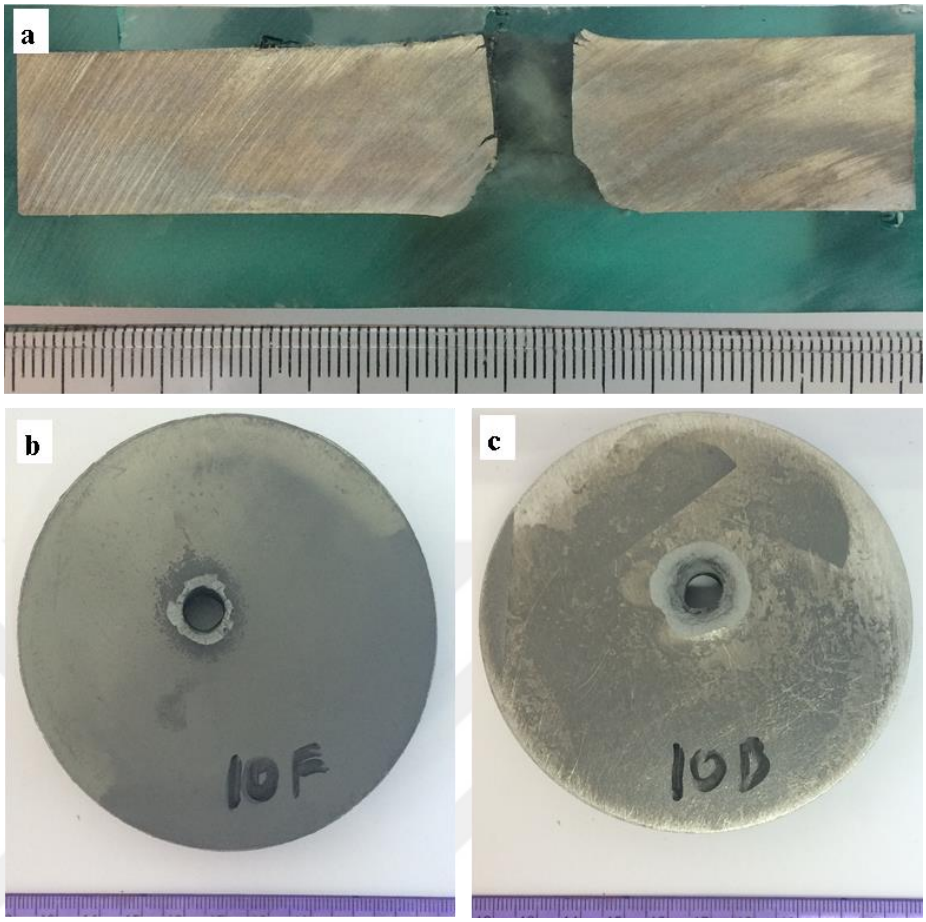
S-5-3 numunesine ait numunenin arka görüntüsü, mermi yolu ve hız tespiti Şekil 3.85'te sunulmuştur. Bu numunede diğerlerine oranla mermi yolunda nispeten fazla olan bir parçalanma söz konusudur. Bu durumun sebebinin numunenin tamamının MMK olması ve mermiden gelen tüm enerjiyi MMK'nın karşılaması olduğu düşünülmektedir. Şekil 3.85'te de görüleceği üzere mermi çıkış hızı (154,0+150,3+152,1)/3= 152,1 m/s olarak tespit edilmiştir. Mermi giriş hızının 766,2 m/s olduğu bilinmektedir. Buna göre S-5-3 numunesi 766,2-152,1= 614,1m/s hız ve dolayısı ile $0,5\times0,0029\times614,1^2$ = 546,8 J enerji absorbe ettiği tespit edilmiştir.



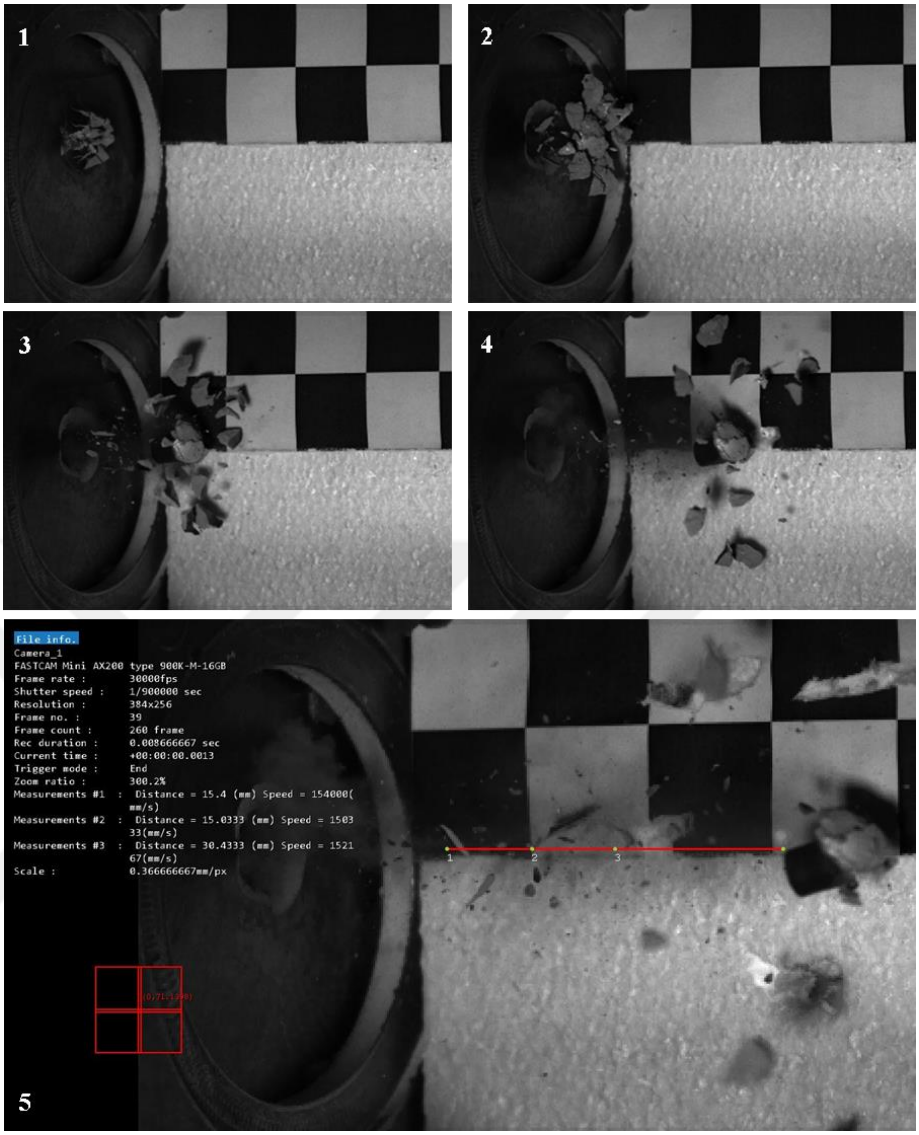
Şekil 3.82. S-5-2'nin kesit (a), ön (b) ve arka (c) görüntüleri.



Şekil 3.83. S-5-2'nin arkasından atış esnasında alınmış sıralı görüntüler.



Şekil 3.84. S-5-3'ün kesit (a), ön (b) ve arka (c) görüntüleri.



Şekil 3.85. S-5-3'ün arkasından atış esnasında alınmış sıralı görüntüler ve hız ölçümü.

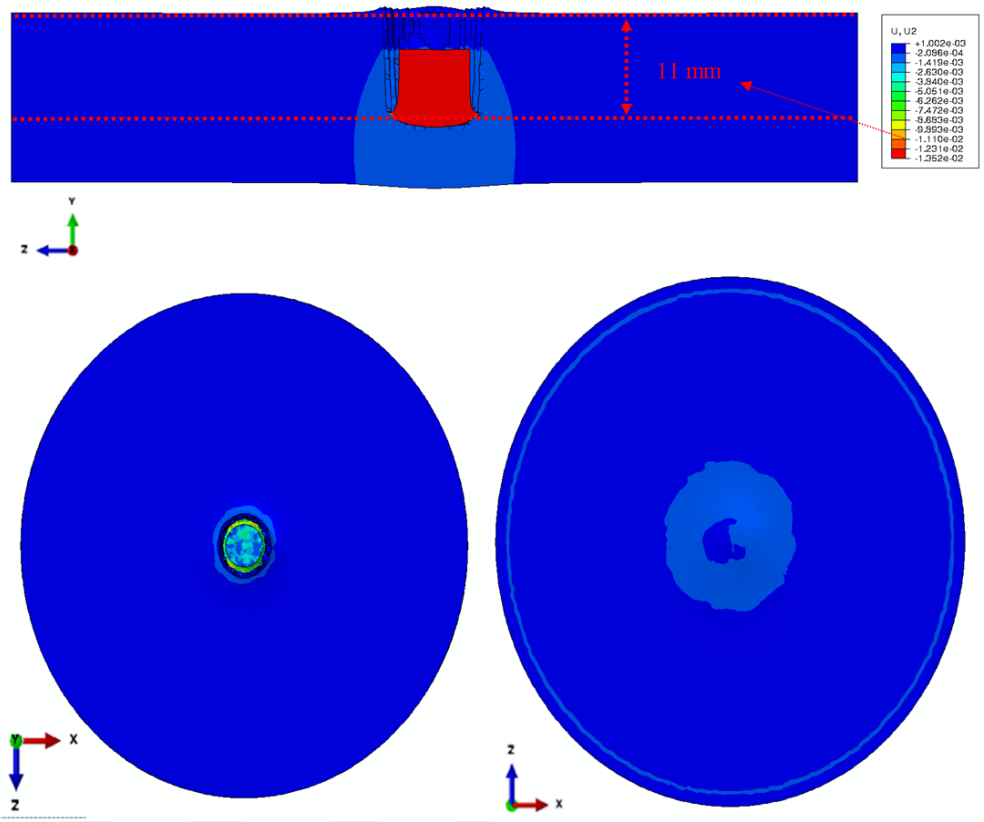
3.3.6. Beşinci Tip Numune Balistik Davranışlarının Nümerik Analizleri

Sadece MMK yapıdan meydana gelmiş beşinci tip numunenin balistik testlerinin sonlu elemanlar ile modelleme sonucu yapılan balistik testlerin sonuçları bu başlık altında ele alınmıştır. 90 mm çapında ve hacimce %20 oranında SiC içeren Al6061 matrisli metal matrisli kompozitler için deneysel çalışmaya paralel olarak üç farlı hız düzeyinde atış gerçekleştirilmiştir. Bu hızlardan ilki 588,4m/s ile S-5-1 numunesinin modeline uygulanmıştır. Bu numunenin sonlu elemanlar analizi ile gerçekleştirilen balistik test sonuçları Şekil 3,86'da yer almaktadır. Bu görselde S-5-1 numunesinin ön, arka ve kesit görüntüsü yer almaktadır. Deneysel sonuçla kıyaslama amacı ile alınan kesit görüntüsü

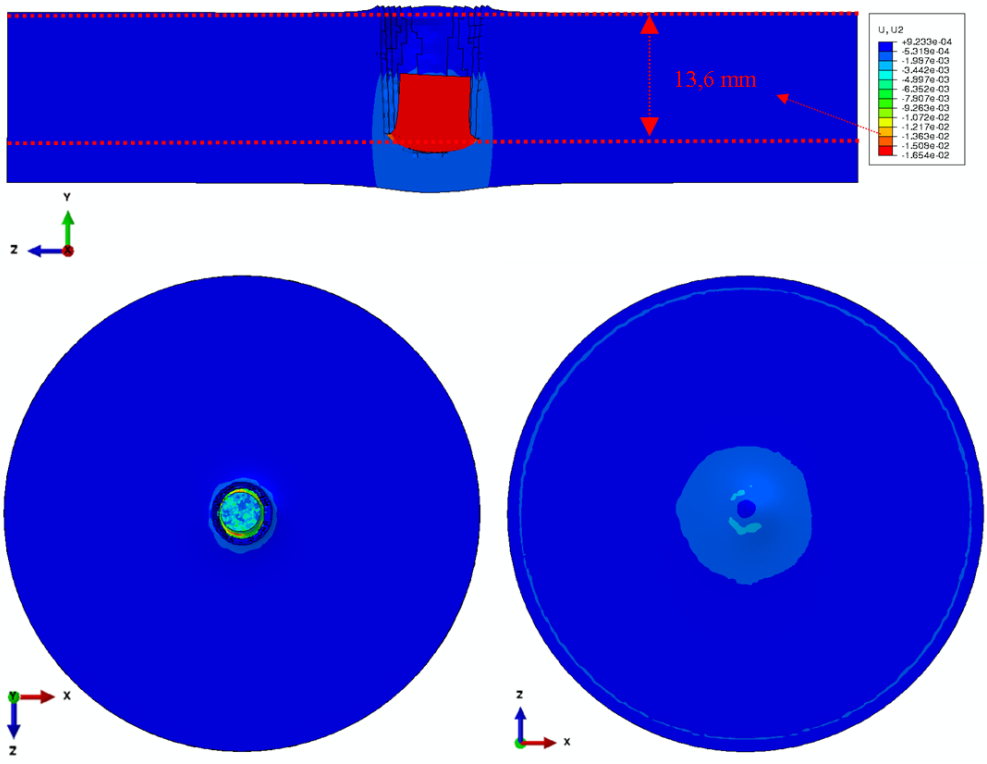
incelendiğinde merminin deneysel sonuçtaki ile benzer sonuç gösterecek şekilde numuneyi delmediği görülmektedir. Merminin kenarları ile beraber tamamının battığı noktadan alınan ölçüme göre penetrasyon miktarı yaklaşık 11 mm dir. Bu durum deneysel sonuçta yaklaşık 10 mm dir. Bunun yanında, hem deneysel hem de nümerik çalışma görüntüleri incelendiğinde mermi giriş bölgelerinin benzer şekilde açıldıkları gözlemlenmiştir.

Beşinci tip numuneye ikinci hız düzeyinde gerçekleştirilen atış S-5-2 numunesinin modellendiği 654,2 m/s hızda gerçekleştirilen atıştır. Bu atışı gösteren nümerik analiz sonucu Şekil 3,87'de verilmiştir. Numune ön arka ve kesit görüntüleri Şekil 3,87'den incelendiğinde bu numunenin de S-5-2 numunesinin deneysel sonucu ile benzer bir davranış sergileyerek delinmediği gözlemlenmiştir. Ek olarak, deneysel olarak ölçülen penetrasyon miktarı yaklaşık olarak 12 mm iken nümerik çalışma sonucu mermi kenarları itibari ile uç noktasından alınan penetrasyon miktarı 13,6 mm dir. Benzer şekilde bu numunede de mermi giriş bölgesinde bir açılma gözlemlenebilmektedir.

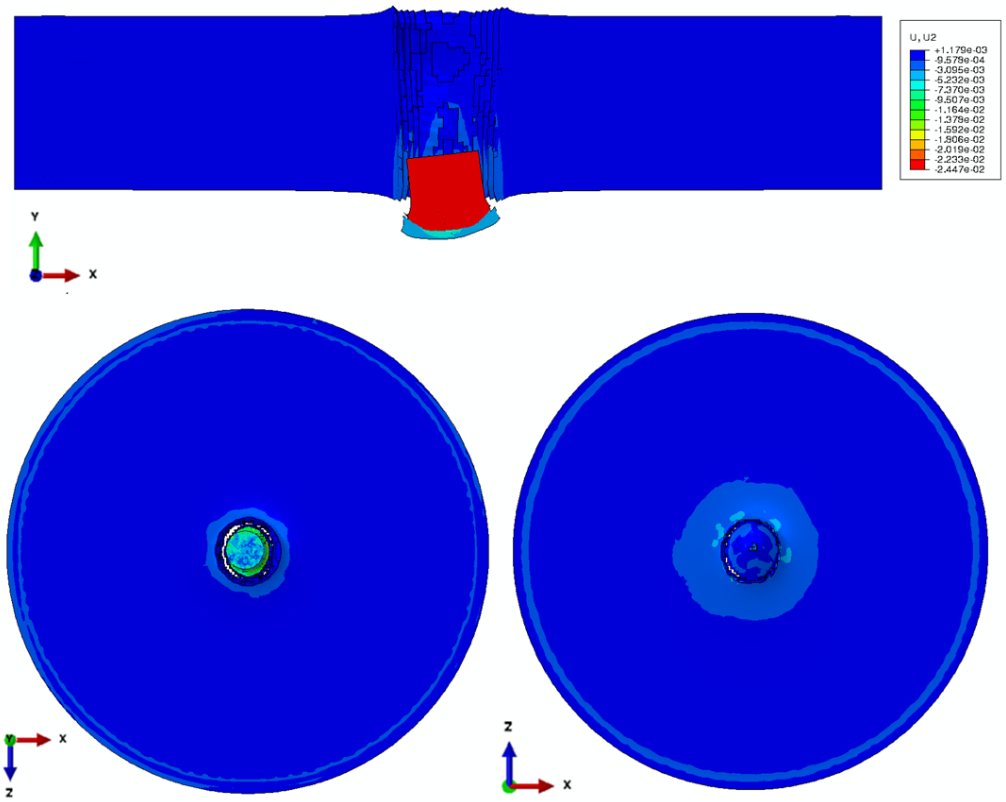
Beşinci tip numuneye üçüncü hız düzeyinde gerçekleştirilen S-5-3 atışının sonlu elemanlar yöntemi ile analiz sonucunda elde edilen numune ön arka ve kesit görüntüleri Şekil 3.88'de sunulmuştur. Bu test deneysel olarak gerçekleştirilen atışa benzer şekilde 766,2 m/s hızda gerçekleştirilmiştir. Bu atışta deneyselde olduğu gibi nümerik çalışma sonucunda da numune delinmiştir. Merminin numune çıkışında sahip olduğu hızı belirlemek için merminin enerji-zaman grafiği çizdirilmiştir. Mermiye ait enerji zaman grafiği Şekil 3. 89'da verilmiştir. Buradan merminin numune çıkışında sahip olduğu enerjinin 31,94 joule olduğu tespit edilmiştir. Mermi ağırlığının 2,9 gr olduğu göz önünde bulundurularak, $0{,}5\times0{,}0029\times V^2 = 31{,}94$ J hesaplaması yapıldığında mermi çıkış hızının yaklaşık olarak 148,4 m/s olduğu tespit edilmiştir. Bu değer deneysel atış sonucu yaklaşık 152,1 m/s olarak tespit edilmişti. Buna göre sonlu elemanlar yöntemi ile gerçekleştirilen analiz sonucu S-5-3 numunesi 766,2-148,4= 617,8 m/s hız ve dolayısı ile $0{,}5\times0{,}0029\times617{,}8^2 = 553{,}4$ J enerji absorbe ettiği belirlenmiştir.



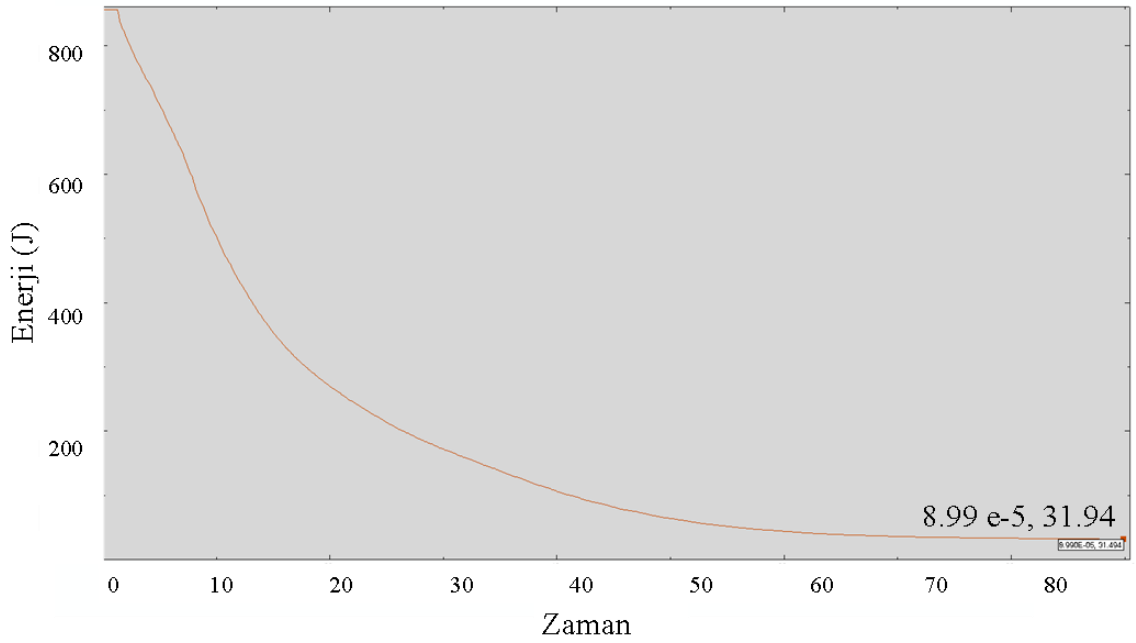
Şekil 3.86. S-5-1'ün SEM analizi sonucu kesit, ön ve arka görüntüleri.



Şekil 3.87. S-5-2'ün SEM analizi sonucu kesit, ön ve arka görüntüleri.



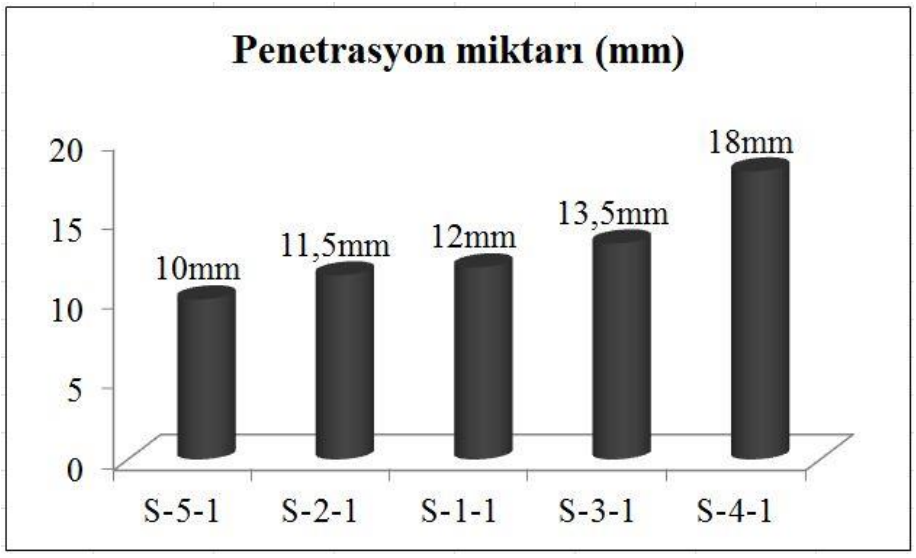
Şekil 3.88. S-5-3'ün SEM analizi sonucu kesit, ön ve arka görüntüleri.



Şekil 3.89. S-5-3 atışına ait merminin SEM analizi sonucu enerji – zaman eğrisi.

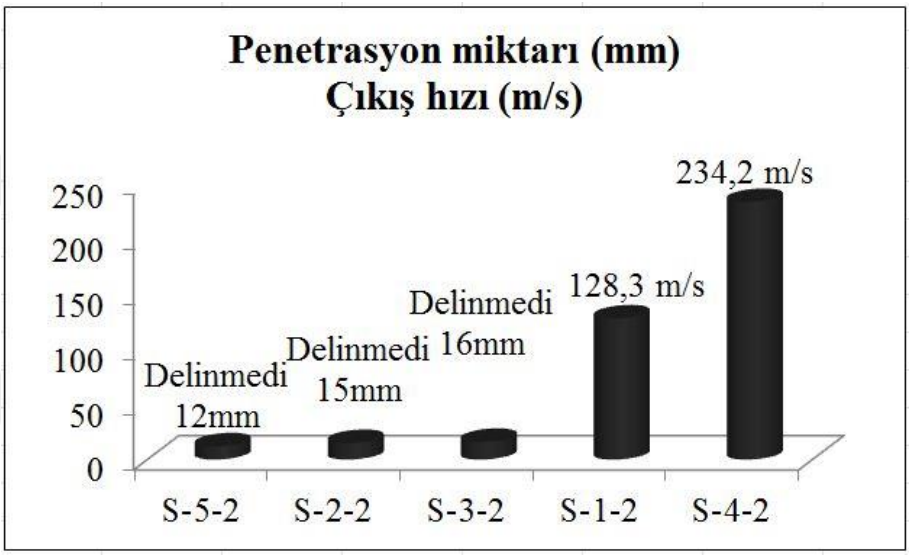
3.3.7. Farklı Tipteki Numunelerin Balistik Davranışlarının Karşılaştırılması

Yapılan balistik testler ile elde dilen sonuçlar numune tipine göre önceki bölümlerde verilmiştir. Bu bölümde hız düzeylerine göre numunelerin gösterdikleri dirençler karşılaştırılacaktır. Buna göre birinci hız düzeyinde yapılan testler ile numunelerde meydana gelen penetrasyon miktarlar Şekil 3.90'da verilmiştir. Bu hız düzeyinde hiçbir numunede delinme gerçekleşmemiş olup tüm numuneler mermiyi başarılı bir şekilde tutmuştur. En az miktara penetrasyona uğrayandan en çok uğrayana doğru sıralama şu şekildedir; S-5-1 (10mm), S-2-1 (11,5mm), S-1-1 (12mm), S-3-1 (13,5mm), S-4-1 (18mm). Buna göre birinci hız düzeyinde elde edilen sonuçlara göre en dirençli numuneden en dirençsize doğru bir sıralama yapılacak olursa, S-5-1, S-2-1, S-1-1, S-3-1, S-4-1 olacak şekilde bir sıralama elde edilebilir. En dayanıksız numunenin tamamen aramit prerpregten elde edilen dördüncü tip numune olduğu tespit edilmiştir. Öte yandan, en dayanıklı numune tamamen MMK'dan elde edilen beşinci tip numune olarak görülse de atış hızları arasındaki farkın yaklaşık 15 m/s olması ve tespit edilen penetrasyon miktarları arasında 1,5 mm gibi bir farkın olması sebebi ile en dayanıklı numunenin tespit edilmesinde diğer hız düzeylerinde yapılan testlerin sonucu ile birlikte değerlendirilmesine karar verilmiştir. Aynı durum birinci tip numune ile üçüncü tip numune arasında yapılacak kıyaslama için de geçerlidir.



Şekil 3.90. Birinci hız düzeyinde yapılan testler sonucu numune çeşitlerinin karşılaştırılması.

İkinci hız düzeyinde gerçekleştirilen testler ile numunelerin bir kısmında delinme meydana gelirken bir kısım numune de mermiyi tutmayı başarmıştır. İkinci düzey hızda gerçekleştirilen testlerden elde edilen sonuçlar penetrasyon miktarı ve mermi çıkış hızlarına göre Şekil 3.91'de verilmiştir. Bu hız düzeyinde üç tip numune delinmemiş ve bunlar penetrasyon miktarlarının az olmasından çok olmasına doğru S-5-2 (12mm), S-2-2 (15mm) ve S-3-2 (16mm) şeklinde sıralanabilir. Bunun yanında iki tip numune delinmiş ve bu numunelerden mermi çıkış hızı az olandan çok olana doğru S-1-2 ve S-4-2 şeklindedir.

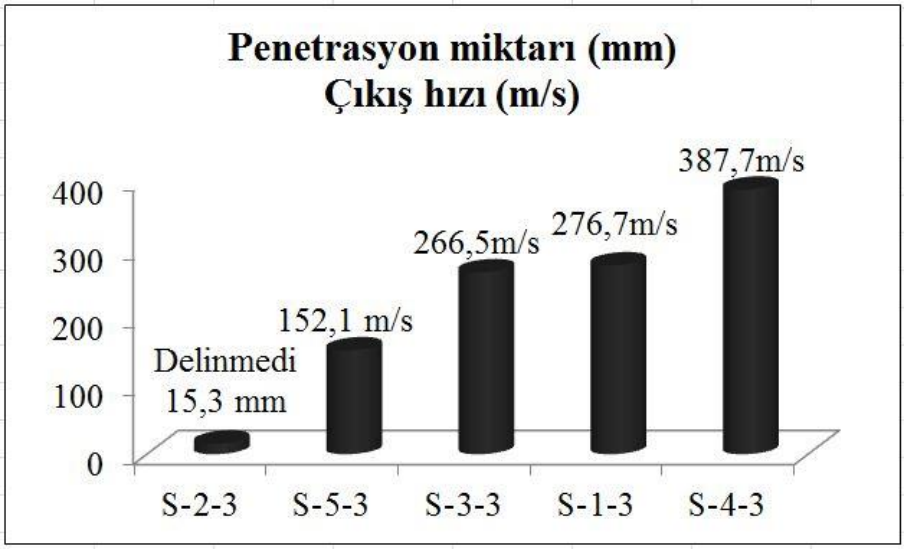


Şekil 3.91. İkinci hız düzeyinde yapılan testler sonucu numune çeşitlerinin karşılaştırılması.

Bütün bu sonuçlar göz önüne alındığında ikinci düzey hızda gerçekleştirilen testler sonucu en dayanıklı numuneden en dayanıksız numuneye doğru sıralama S-5-2, S-2-2, S-3-2, S-1-2, S-4-2 şeklindedir. Bu hız düzeyine göre de önceki hız düzeyine benzer şekilde en dayanıksız numune dördüncü tip numune olan ve tamamen PMK dan meydana gelmiş numune olarak tespit edilmiştir. Dördüncü tip numuneye göre daha dayanıklı olan numune ise ön tarafı PMK arka tarafı MMK olan birinci tip numunedir. Ön ve arka tarafı PMK ortası MMK olan numune mermiyi başarılı bir şekilde tutmuş ve delinmemiştir.

Üçüncü hız düzeyinde gerçekleştirilen testlerin sonuçları Şekil 3.92'de verilmiştir. Buna göre ikinci tip numune önceki iki hız düzeyine benzer bir şekilde mermiyi başarılı bir şekilde tutmuş ve delinmemiştir. Bu sonuçlar neticesinde sandviç yapının delinebilme

hızını tespit etmek için bir atış daha gerçekleştirilmiştir. Bu atış atış S-2-4 atışıdır. Bu testte bölüm laboratuvar imkanlarının izin verdiği en üst düzeydeki hız olan 803,2 m/s de atış gerçekleştirilmiş ancak buna rağmen numune delinmemiştir. Bu sonuçtan da yola çıkarak en dayanıklı numunenin ön tarafın MMK arka tarafın PMK olduğu ikinci tip numune olduğu sonucuna varılmıştır. Bu numune tipinde gelen mermi MMK ile karşılaştığında enerjinin çoğunu MMK ya ileterek bu katmanı delmekte ikinci katmanda nispeten esnek olan PMK ile karşılaşmaktadır. Bu aşamada PMK esnek davranarak merminin enerjisini tamamen soğurmaktadır. Burada PMK yapının bir miktar daha ince olması ya da epoksi miktarının daha fazla olması halinde yapının biraz daha gevrek bir hal alacağı ve merminin geçişine izin vereceği öngörülebilir. Bu nedenle, üretim esnasındaki basınç ve katman sayısının optimum olduğu sonucuna varılmıştır. En dayanıklı ikinci numune tamamen MMK'dan üretilen beşinci tip numunedir. Üçüncü hız düzeyinde gerçekleştirilen test sonucu bu numune delinmiş ancak çıkış hız nispeten düşük olan 152,1m/s olarak ölçülmüştür. Buna ilave olarak üçüncü tip numune olan ön ve arka yüzeyi PMK ile kaplanan numune, en dayanıklı üçüncü numune olarak tespit edilmiştir. En dayanıksız numune ise önceki iki hız düzeyinde de benzer sonuç gösteren dördüncü tip numunedir.



Şekil 3.92. Üçüncü hız düzeyinde yapılan testler sonucu numune çeşitlerinin karşılaştırılması.

Bu sonuçlara göre üçüncü hız düzeyinde en dayanıklı numuneden en dayanıksız numuneye doğru S-2, S-5, S-3, S-1, S-4 olacak şekilde bir sıralama elde edilmiş olur. Bu sonuçlardan merminin ilk olarak MMK yüzeye gelmesi daha sonra PMK'nın esnek

bir davranış sergileyerek mermiyi tutmasının numune direnci açısından oldukça önemli olduğu sonucuna varılmıştır. Bütün numunelere ait test sonuçları Şekil 3.93'te verilmiştir.

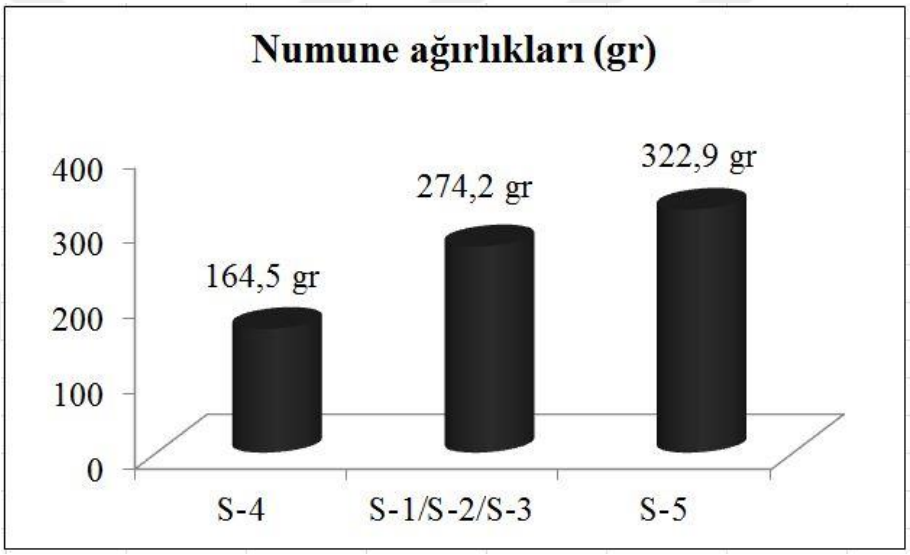
PMK PMK MMK	MMK PMK PMK	PMK MMK PMK	PMK PMK PMK	MMK MMK MMK
S-1-1 589,2 m/s Delinmedi Penetrasyon:12 mm	S-2-1 613,6 m/s Delinmedi Penetrasyon:11,5 mm	S-3-1 602 m/s Delinmedi Penetrasyon:13,5 mm	S-4-1 587,5 m/s Delinmedi Penetrasyon:18 mm	S-5-1 588,4 m/s Delinmedi Penetrasyon:10 mm
S-1-2 656,2 m/s **Delindi** Mermi çıkış hızı: 128,3 m/s	S-2-2 665,6 m/s Delinmedi Penetrasyon:15 mm	S-3-2 665,5 m/s Delinmedi Penetrasyon:16 mm	S-4-2 661,3 m/s **Delindi** Mermi çıkış hızı: 234,2 m/s	S-5-2 654,2 m/s Delinmedi Penetrasyon:12 mm
S-1-3 758 m/s **Delindi** Mermi çıkış hızı: 276,7 m/s	S-2-3 779,2 m/s Delinmedi Penetrasyon:15,3 mm	S-3-3 775,4 m/s **Delindi** Mermi çıkış hızı: 266,5 m/s	S-4-3 755,1 m/s **Delindi** Mermi çıkış hızı: 387,7 m/s	S-5-3 766,2 m/s **Delindi** Mermi çıkış hızı: 152,1 m/s
	S-2-4 803,2 m/s Delinmedi Penetrasyon:16 mm			

Şekil 3.93. Bütün numunelere ait balistik test sonuçları.

Son olarak numunelerin ağırlıkları Tablo 3.5'te verilmiştir. Buna göre birinci ikinci ve üçüncü tip numunelerin ağırlıkları eşit miktarda malzemeler kullanıldığı için neredeyse aynıdır. Beşinci tip numune ağırlığı dördüncü tip numune ağırlığının neredeyse iki katı kadardır. Ağırlıklara göre numunelerin karşılaştırılması Şekil 3.94'te sunulmuştur. Görüldüğü üzere dördüncü tip numune diğer tipteki numunelere oranla oldukça farklı olarak en hafif numunedir. Kullanım yerine göre yani numunelerden beklenen özelliklerin önceliğine göre numunelerin dayanım ve ağırlıklarını birlikte düşünmesi tasarım açısından son derece önemlidir.

Tablo 3.5. Sandviç yapı ağırlıkları.

S-1 (gr)	S-2 (gr)	S-3 (gr)	S-4 (gr)	S-5 (gr)
274,0	275,0	277,0	167,0	322,8
273,1	273,7	275,0	162,2	324,2
271,3	275,4	274,3	164,3	321,8
	274,2			
Ort. 272,8	Ort. 274,5	Ort. 275,4	Ort. 164,5	Ort. 322,9



Şekil 3.94. Sandviç yapı ağırlıkları.

4. BÖLÜM

SONUÇ VE ÖNERİLER

4.1. Sonuç ve Öneriler

Bu tez çalışmasında metal matrisli kompozit ve polimer matrisli kompozit tabakalardan üretilmiş yeni bir çeşit sandviç yapının balistik davranışları incelenmiştir. Bu amaçla öncelikle metal matrisli kompozit takviye elamanı türüne karar vermek için hacimce % 0, 5, 10, 15 oranında SiC ve B_4C içeren Al6061 bazlı metal matrisli kompozit numuneler üretilmiştir. Bu kompozit numuneler 50 Joule enerjiye denk gelecek şekilde 4,45 m/s hızda 10 mm yarıçaplı yarı küresel uç kullanılarak ağırlık düşürme yöntemi ile düşük hızlı darbeye maruz bırakılmışlardır. Elde edilen temas kuvveti – zaman ve enerji – zaman verileri incelendiğinde SiC ve B_4C takviye türünün kompozit malzemenin darbe direncine katkılarının birbirlerine yakın oldukları görülmüştür. Metal matrisli kompozit malzeme darbe direncine katkılarının birbirlerine yakın olması, B_4C malzemesinin SiC malzemesine göre pahalı olması ve nispeten daha zor bulunması sebebi ile tez çalışmasında metal matrisli kompozit malzemelerde takviye malzemesi olarak SiC tozunun kullanılmasına karar verilmiştir. Kullanılan SiC takviye oranına karar vermek adına hacimce % 5, 10 ve 15 oranında takviyeli kompozit numunelere ek olarak hacimce % 20, 30 ve 40 oranında yeni kompozit numuneler üretilmiş ve önceki testlerle aynı şartlar altında düşük hızlı darbe testlerine tabi tutulmuşlardır. Düşük hızlı darbe testlerine ilaveten balistik testler için 90 mm çapında hacimce % 0, 10, 20, 30 oranında SiC takviye içeren numuneler üretilmiş ve 500 m/s hızında atışlar gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen hem düşük hızlı darbe testleri hem de balistik testlerden elde edilen veriler ve metal matrisli kompozitlerde takviye hacim oranının artması ile meydana gelen gevreklik nedeniyle tez çalışması için üretilecek metal matrisli kompozitlerin takviye hacim oranının % 20 olmasına karar verilmiş ve bundan

sonraki üretimler bu doğrultuda gerçekleşmiştir. Üretim yöntemi olarak toz metalurjisi yöntemlerinden olan sıcak pres tekniği kullanılmıştır. Böylece pres ve ısının eş zamanlı uygulanması ile daha üstün özellikli metal matrisli kompozit numuneler üretilmiştir. Elde edilen metal matrisli kompozit malzemeler zımparalama ve parlatma aşamalarından geçirilerek yüzeyleri temizlenmiş ve son olarak PMK yapı ile birleştirilmesine katkı sağlayacak şekilde yüzeyler zımpara ile pürüzlendirilmiştir.

PMK yapılar için aramit fiber takviyeli prepreg yapılar dışardan temin edilmiş otoklav yöntemine alternatif olarak belirlenmiş sıcak pres yardımı ile MMK yapılar ile birleştirilerek kürlenmesi sağlanmıştır.

Metal matrisli kompozit malzeme ve polimer matrisli kompozit malzemelerin yoğunlukları Arşimet prensibine göre deneysel olarak ölçülmüştür. Metal matrisli kompozit malzemenin teorik yoğunluğu da hesaplanıp porozite oranları ortaya konmuştur. Sonuçlar birbirine çok yakın ve makul seviyelerde elde edilmiştir.

PMK yapıyı oluşturan aramit bazlı prepreg den elde edilmiş kompozit numunelerin düşük hızda farklı enerjilerde darbe testleri gerçekleştirilmiş ve PMK'ların farklı enerjide maruz kaldıkları darbeye gösterdikleri direnç ortaya konmuştur. Buna göre enerji seviyesi arttıkça PMK yapı daha rijit bir davranış sergilemiştir.

Metal matrisli kompozit malzemenin sertlik değerleri deneysel olarak ölçülmüş ve takviye oranı ile birlikte nasıl değiştiği ortaya konmuştur. Takviye oranının artması ile metal matrisli kompozit numunelerin sertliklerinde artış meydana gelmiştir. Metal matrisli kompozitleri oluşturan tozların ve metal matrisli kompozit malzemelerin taramalı elektron mikroskobu görüntüleri alınıp incelenmiştir. Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak metal matrisli kompozit malzemeler modellenmiş ve düşük hızda darbe testleri ve balistik testleri nümerik olarak gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Nümerik çalışmada düşük hızda darbe testleri için kullanılan numune boyutları daha küçük olması ve daha az eleman ortaya çıkması nedeniyle, takviye SiC boyutu esas alınarak bir meshleme yapılmıştır. Takviye hacim oranı mesh sayısının yüzdesi esas alan bir algoritma Python yazılımı yardımı ile oluşturulmuş ve takviye oranına göre seramik partiküller rastgele dağıtılmıştır. Bu sayede gerçek partikül takviyeli metal matrisli kompozit yapısına yakın bir metal

matrisli kompozit yapı elde edilmiştir. Matris malzemesi elastoplastik olarak tanımlanmış olup bunun yanında, Al6061 için Johnson - Cook ve takviye partikülleri için Johnson - Holmquist hasar parametreleri de kullanılmıştır. Deneysel ve nümerik analiz sonuçları nispeten uyumlu sonuçlar vermiş ve takviye hacim oranı arttıkça MMK yapının düşük hızlı darbeye karşı artan gevreklikle birlikte daha rijit bir davranış sergilediğini göstermiştir.

Balistik testler için bu yöntemi kullanmak numune boyutları ve bilgisayar kapasiteleri nedeni ile mümkün olmadığı için MMK'dan oluşan beşinci tip numunenin modellenmesi için Split Hopkinson basınçlı test çubuğu ile yüksek strain rate'lerde atış gerçekleştirilmiş ve bu test sonucu elde edilen veriler nümerik çalışma için kullanılmıştır.

Üç farklı konfigürasyonda MMK ve PMK yapı eşdeğer kalınlıkta olacak şekilde üretilmiştir. Bunun yanı sıra, eş değer kalınlıkta tamamı PMK ve MMK olan yapılar da üretilmiştir. Böylece beş farklı yapı elde edilmiştir. Bu numunelere üç farklı hız düzeyinde ortalama 600, 660 ve 765 m/s hızlarda balistik testler yapılmış ve numunelerin bu testlere karşı koydukları dirençler belirlenmiştir. Atış sonucu delinen numuneler için mermi giriş ve çıkış hızı farkından yola çıkarak absorbe edilen enerjiler hesaplanmıştır. Delinmeyen numuneler için ise mermi ucundan itibaren gerçekleşen penetrasyon ölçülmüştür. Bu şekilde numuneler in darbe direnci üzerinde PMK ve MMK yapının dizilim sırasının önemi ortaya konmuştur.

Birinci hız düzeyinde (600 m/s) yapılan testler sonucu hiçbir numunede delinme gerçekleşmemiş olup tüm numuneler mermiyi başarılı bir şekilde tutmuştur. En az miktarda penetrasyona uğrayandan en çok uğrayana doğru sıralama şu şekildedir; S-5-1 (10mm), S-2-1 (11,5mm), S-1-1 (12mm), S-3-1 (13,5mm), S-4-1 (18mm). Buna göre birinci hız düzeyinde elde edilen sonuçlara göre en dirençli numuneden en dirençsize doğru bir sıralama yapılacak olursa, S-5-1 (MMK), S-2-1 (MMK-PMK), S-1-1 (PMK-MMK), S-3-1 (PMK-MMK-PMK), S-4-1 (PMK) olacak şekilde bir sıralama elde edilebilir. En dayanıksız numunenin tamamen aramit prerpregten elde edilen dördüncü tip numune olduğu tespit edilmiştir. İkinci hız düzeyinde (660 m/s) gerçekleştirilen testler ile numunelerin bir kısmında delinme meydana gelirken bir kısım numune de mermiyi tutmayı başarmıştır. Bu hız düzeyinde üç tip numune delinmemiş ve bunlar

penetrasyon miktarlarının az olandan çok olana doğru S-5-2 (MMK) 12mm, S-2-2 (MMK-PMK) 15mm ve S-3-2 (PMK-MMK-PMK) 16mm şeklinde sıralanabilir. Bunun yanında iki tip numune delinmiş ve bu numunelerden mermi çıkış hızı az olandan çok olana doğru S-1-2 (PMK-MMK) ve S-4-2 (PMK) şeklindedir. İkinci düzey hızda gerçekleştirilen testler sonucu en dayanıklı numuneden en dayanıksız numuneye doğru sıralama S-5-2 (MMK), S-2-2 (MMK-PMK), S-3-2 (PMK-MMK-PMK), S-1-2 (PMK-MMK), S-4-2 (PMK) şeklindedir. Bu hız düzeyine göre de önceki hız düzeyine benzer şekilde en dayanıksız numune dördüncü tip numune olan ve tamamen PMK'dan meydana gelmiş numune olarak tespit edilmiştir. Dördüncü tip numuneye göre daha dayanıklı olan numune ise ön tarafı PMK arka tarafı MMK olan birinci tip numunedir. Ön ve arka tarafı PMK ortası MMK olan numune mermiyi başarılı bir şekilde tutmuş ve delinmemiştir. Üçüncü hız düzeyinde (765 m/s) gerçekleştirilen testlere göre ikinci tip numune önceki iki hız düzeyine benzer bir şekilde mermiyi başarılı bir şekilde tutmuş ve delinmemiştir. Bu sonuçtan da yola çıkarak en dayanıklı numunenin ön tarafın MMK arka tarafın PMK olduğu ikinci tip numune olduğu sonucuna varılmıştır. En dayanıklı ikinci numune tamamen MMK'dan üretilen beşinci tip numunedir. Üçüncü hız düzeyinde gerçekleştirilen test sonucu bu numune delinmiş ancak çıkış hız nispeten düşük olan 152,1m/s olarak ölçülmüştür. Buna ilave olarak üçüncü tip numune olan ön ve arka yüzeyi PMK ile kaplanan numune, en dayanıklı üçüncü numune olarak tespit edilmiştir. En dayanıksız numune ise önceki iki hız düzeyinde de benzer sonuç gösteren dördüncü tip numunedir.

İlerleyen çalışmalarda sandviç yapı çeşitlerinin tamamı için nümerik çalışmaların yürütülmesinin faydalı olacağı düşünülmektedir. Bunun yanında sandviç yapıyı oluşturan Al6061/SiC MMK yerine farklı takviye ve matris malzemesinin kullanılarak elde edilen MMK yapılar ya da metal ve alaşımlarının kullanılması ile yapılacak çalışmaların faydalı olabileceği öngörülmektedir. Aramit takviyeli prepreg malzeme yerine çeşitli fiberler ile güçlendirilmiş PMK yapıların farklı üretim yöntemleri ile üretilmesi sonucu gevrekliklerinde meydana gelen değişme sonucu ortaya koyacakları darbe direncindeki değişikliklerin inceleneceği çalışmaların bu alanda yol gösterici olacağı düşünülmektedir.

KAYNAKÇA

1. Laliberte, J. F., Poon, C., Straznicky, P. V., Fahr, A. 2000. Applications of fiber-metal laminates. **Polymer Composites**, vol. 21, no. 4, p. 558-567.
2. Botelho E.C., Silva R.A., Pardini L.C., Rezende M.C., 2006. A review on the development and properties of continuous fiber/epoxy/aluminum hybrid composites for aircraft structures. **Materials Research**,9(3), 247–256.
3. Marissen R., Vogelesang LB, 1981. Development of a new hybrid material: aramid reinforced aluminium laminate (Arall). *SAMPE Conference*, Cannes.
4. M. Sadighi, R.C., Alderliesten, R. Benedictus., 2012. Impact resistance of fiber-metal laminates: A review. **ınternational journal of ımpact engineering** 49, 77-90.
5. Beumler T, Pellenkoft F, Tillich A, Wohlers W, Smart C, 2006. Airbus costumer benefit from fiber metal laminates. *Airbus Deutschland GmbH*; Ref. no: L53pr0605135- Issue 1, 1–18.
6. Alderliesten R.C., Benedictus R., 2007. Fiber/metal composite technology for future primary aircraft structures. *In: 48th Aiaa/Asme/Asce/Ahs/Asc structures, structural dynamics, and materials conference* 15th, Honolulu, Hawaii, 1–12.
7. Cortes P., Cantwell WJ, 2006. The prediction of tensile failure in titanium-based thermoplastic fibre metal laminates. **Compos SCI Technology**, 66, 23 06–16.
8. Gutowski TG., 1997. Advanced Composites Manufacturing. First edition, John Wiley & Sons, New York, USA.
9. Vogelesang LB, Vlot A., 2000. Development of fiber metal laminates for advanced. **Journal Mater Process Technol**. 103, 1–5.
10. Alderliesten R. 2009. On the development of hybrid material concepts for aircraft structures. Recent Patents Eng, 3, pp.25-38.
11. Vlot A., 1996. Impact loading on fibre metal laminates. **International Journal Impact Engineering** ,18(3), 291–307.
12. Vlot A.,Gunnink JW., 2001. Fibre Metal Laminates. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands.
13. Reyes Villanueva G, Cantwell WJ, 2000. The mechanical properties of fibre-metal laminates based on glass fibre reinforced polypropylene. **Composite Science Technology**, 60(7), 1085-94.
14. Sinmazçelik T, Avcu E., Bora M, Çoban O., 2014. A review: Fibre metal laminates, background, bonding types and applied test methods. **Composite Structures**. 107, 363–381.
15. Volt, Jan Willem, 2001. Fiber metal laminates-Introduction. Springer- Science+ Business Media, B,V. ISBN 978-1-4020-0391-2.
16. Hariharan E., R. Santhana Krishnan, 2016. Experimental analysis of fiber metal laminates with aluminium alloy for aircraft structures. *IJESRT*, ISSN: 2277-9655.

17. Liu Q., Ma, J., Kang, L., Sun G., 2015. An experimental study on fatigue characteristics of CFRP-steel hybrid laminates. **Materials and Design** 88, 643–650.
18. Parnanen, T., Kanerva, M., Sarlin, E., Saarela, O., 2015. Debonding and impact damage in stainless steel fibre metal laminates prior to metal fracture. **Composite Structures** 119, 777–786.
19. Rajkumar, G.R., Krishna, M., 2014. Investigation of tensile and bending behavior of aluminium base hybrid fiber metal laminates. *International Conference of Advance in Manufacturing and Materials Engineering (AMME - 2014)*, Procedia of material science,5, pp.60-68.
20. Vasumathi M., Murali, V., 2013. Effect of alternate metals for use in natural fiber reinforced fiber metal laminates under bending, impact and axial loadings. *International Conference on Design and Manufacturing, IConDM*, Procedia Engineering, 64, 562-570.
21. Carrillo JG, Cantwell WJ., 2009. Mechanical properties of a novel fiber–metal laminate based on a polypropylene composite. **Mechanical Materials**, 41, 828–38.
22. Abdullah M. R., Cantwell W. J., 2006. The impact resistance of polypropylene-based fibre–metal laminates, **Compos Science Technology**, 66, 1682–93.
23. Park S. Y., Choi W. J., Choi H. S., Kwon H., Kim S. H., 2010. Recent trends in surface treatment technologies for airframe adhesive bonding processing: a review. **Journal of Adhesion**, 86, 192–221.
24. Critchlow G. W., Yendall K. A., Bahrani D., Quinn A., Andrews F., 2006. Strategies for the replacement of chromic acid anodising for the structural bonding of aluminium alloys**. International Journal of Adhesion**, 26, 419–53.
25. Critchlow G. W., Brewis D. M., 1996. Review of surface pretreatments for aluminium alloys. **International Journal of Adhesion**, 16, 4, 255–75.
26. Bishopp A., 2005. Handbook of adhesives and sealants, Amsterdam: Elsevier.
27. Song S. H., Byun Y., S., Ku T. W., Song W. J., Kim J, Kang B. S., 2010. Experimental and numerical investigation on impact performance of carbon reinforced aluminum laminates**. Journal of Materials Science and Technolgy**, 26, 327–32.
28. Tsartsaris N., Meo M., Dolce F., Polimeno U., Guida M., Marulo F., 2011. Low-velocity impact behavior of fiber metal laminates. **Journal of Composite Materials,** 45, 803–814.
29. Yaghoubi A. S., Liu Y. X., Liaw B. M., 2011. Drop-weight impact studies of GLARE 5 fiber metal laminates. **Journal of Materials Science and Technolgy** 267–79.
30. Fan J., Cantwell W., Guan Z., 2011. The low-velocity impact response of fiber-metal laminates. **Journal of Reinforced Plastic Composites**, 30, 26–35.
31. Fan J., Guan Z. W., Cantwell W. J., 2011. Numerical modelling of perforation failure in fibre metal laminates subjected to low velocity impact loading. **Composite Structure**. 93, 2430–2436.

32. Moriniere F. D., Alderliesten R. C., Sadighi M., Benedictus R., 2013. An integrated study on the low velocity impact response of the GLARE fiber-metal laminate. **Composite Structure,** 100, 89–103.
33. Hashagen F., 1998. Numerical Analysis Of Failure Mechanisms İn Fiber Metal Laminates. PhD Thesis, Delft University of Technology.
34. Zhu S., Chai G. B., 2012. Low-velocity impact response of fibre-metal laminates –experimental and finite element analysis**. Composite Science and Technology**, 72, 1793–802.
35. Sadighi M., Pärnänen T., Alderliesten R. C., Sayeaftabi M., Benedictus R., 2011. Experimental and numerical investigation of metal type and thickness effects on the impact resistance of fiber metal laminates. **Applied Composite Materials**,19, 5, 45–59.
36. Linde, P., Pleitner, J., de Boer, H., Carmone, C., 2004. Modeling and simulation of fiber metal laminates. *ABAQUS Users Conference,* Boston, Massachusetts.
37. Jeremy C. P., 2008. Numerical modeling of the impact response of fiber– metal laminates. **polymer composites**, 60, 3–11.
38. Laliberta, j., Poon, C., Numerical modelling of low-velocity impact damage in fibre-metal-laminates, *ICAS2002 CONGRESS*, Canada, 1-10.
39. Ahmed S. M., Kumar C. A., 2014. Mechanical characterization and analysis of perforated fiber metal laminates ,*(IJETT)*, 13-21.
40. Nakatani H., Kosaka T., Osaka K., Sawada Y., 2011. Damage characterization of titanium/GFRP hybrid laminates subjected to low-velocity impact. **Compos Aart A Applied Science and Manufacturing,** 42, 772–781.
41. Palta, A., 2009. Yerinde Oluşturulmuş Magnezyum Silisit Partikül Takviyeli Alüminyum-Magnezyum-Silisyum Matrisli Kompozitlerin Aşınma ve Korozyon Davranışlarına Titanyum ve Bakırın Etkisinin İncelenmesi, Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitisü, yüksek lisans tezi, Karabük, 142.
42. Kök, M., 2001. Al_2O_3 partikül takviyeli 2024 alüminyum metal matrisli kompozitlerin üretimi, **Kahramanmaras Sütçü imam Üniv., Fen ve Mühendislik Dergisi**, **20 (2):**131-142.
43. Sahin, İ., 2004. Silisyum Karbür Takviyeli Al-Si Matrisli Kompozit Malzemelerin Mikroyapılarının ve Mekanik Özelliklerinin incelenmesi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, İstanbul,165.
44. Chawala, N., Chawala, K., 2013. Metal Matrix Composites**.** Springer New York Heidelberg Dordrecht London.
45. Clyne, T. W., 2001. Metal matrix composites: matrices and processing, Encyclopaedia of Materials: Science and Technology, Elsevier.
46. Çavuşoğlu, Ü., 2013. Magnezyum Matrisli B_4C Takviyeli Kompozit Malzeme Üretimi. Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, İstanbul. 125.
47. Nishida, Y., 2001. Introduction to Metal Matrix Composites, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology Nagoya, Japan.

48. Nas, E., Gökkaya, H., Sur, G., 2013. Sıcak presleme yöntemi kullanılarak kompozit malzemelerin üretilebilirliği üzerine bir değerlendirme. ***Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi,*** **3** (2): 56-65.
49. Kaya, G., 1999. Mechanical Properties of PM Al-SiC Compozites Produced By Conventional Hot Pressing Method. Ortadoğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi Ankara.
50. Ergün, N., 2006. Bor Karbür-Silisyum Karbür Kompozitlerinin Reaktif Sıcak Presleme İle Üretilmesi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
51. Köksal, F., 2004**.** Al-Cu-SiC ve Al-Cu-B4C Kompozitlerin Sıcak Presleme Yöntemi ile Üretimi ve Aşınma Özelliklerinin Araştırılması. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Isparta.
52. Akınay, Y., Aygül, O., Akın, E., Akyıl, H., Çakı, A., Yıldız, B., 2009. Magnezyum matrisli kompozit üretimi proses tasarımı. **Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi,** 45, 112-121.
53. Tekoğlu, E., 2015. Mekanik Alaşımlama Yöntemleri ile Üretilmiş Al15Si2, 5 Cu 0,5Mg Matriksli ve CeO2, Y2O3, La2O3 Pekiştiricili Kompozitlerin Geliştirilmesi ve Karakterizasyonu. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
54. Ruiz-Navas, E. M., Fogagnolo, J. B., Velasco, F., Ruiz-Prieto, J. M., Froyen, L., 2006. One step production of aluminium matrix composite powders by mechanical alloying. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 37:** 2114-2120.
55. Surappa M.K., Sivakumar P., 1993. Fracture toughness evaluation of 2024-Al/Al_2O_3 particulate composites by instrumented impact. **Composites Science and Technology**, 46 (3), 287-292,
56. Kim H.J., Kobayashi T., Yoon H.S., 1992. Micromechanical fracture process of SiC particulate reinforced Al alloy 6061-T6 MMCs. **Materials Science and Engineering A,** 154, 35–41,
57. Ekici, R., Kosedag, E., 2017. Comparison of the low-velocity impact behaviors of SiC and Pumice particle-reinforced metal matrix composites. **International Journal of Mechanical and Production Engineering,** 5 (10), 101-105, 2017.
58. Kurzawa, A., Kacmar, J.W., 2017. Impact strength of composite materials based on EN AC-44200 matrix reinforced with Al2O3 particles. **Archives of Foundry Engineering,** 17, 73-78.
59. Ahlatcı, H., Candan, E., Çımenoğlu, H., 2002. "Effect of particle size on the mechanical properties of 60 vol. % SiCp reinforced Al matrix composites. **Zeitschrift fur Metallkunde**, 93 (4), 330-333.
60. Ozden, S., Ekıcı, R., Naır, F., 2007. Investigation of impact behaviour of aluminium based SiC particle reinforced metal–matrix composites. **Composites: Part A**, 38 (2), 484–494.

61. Bonollo, F., Ceschını, L., Garagnanı, G.L., 1997. Mechanical and impact behaviour of (Al2O3)p/2014 and (Al2O3)p/6061 Al metal matrix composites in the 25-200 °C range. **Applied Composite Materials**, 4, 173-185.
62. Ekıcı, R., Kaburcuk, M., 2015. Low-velocity impact behavior of Al 6061/SiC particulate metal matrix composites. **Journal of Composite Materials**, 49(7), 853-871.
63. Karamis, M., Nair, F., Tasdemirci, A., 2004. Analysesof metalurgical behavior of Al-SiCp composite after balistic impacts. **Composite Structures**, 64(2):219-226.
64. Ekici, R., 2016. Repeated low-vlocity impact behavior of particle-reinforced metal matrix composites, *2nd International Conference On Engineering And Natural Sciences (Icens 2016),* 1877-1882, Sarajevo, Bosna Hersek, 24-28 Mayıs, 2016.
65. Şahin, E., 2011. $AlMg_3$/SiCp Kompozit Malzemelerinin Darbe Davranışının Takviye Oranı İle Değişiminin İncelenmesi, Trakya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Edirne.
66. Cerit, A.A.,2014. Investigation of the low-speed impact behavior of dual particle size metal matrix composites. **Materials & Design**, 57, 330-335.
67. Lapin, J., Klimova, A., Gabalcova, Z., Pelachova, T., Bajana, O., Stamborska, M., 2017. Microstructure and mechanical properties of cast in-situ tial matrix composites reinforced with (Ti,Nb) particles. **Materials & Design,** 133, 404-415,
68. Narayan, S., Rajeshkannan, A., Hardness, 2017. Tensile and impact behaviour of hot forged aluminium metal matrix composites, **Journal Of Materials Research And Technology,** 6, 213-219.
69. Ellis, Y.L., Lewandowski, J.J., 1994. Effects of layer thickness on impact toughness of Al/Al-SiCp laminates. **Materials Science And Engineering A**, 183 (1-2), 59-67.
70. Wang, F., Ma, N., Li, Y., Li, X., Wang, H., 2011. Impact behavior of in situ Tib2/Al composite at various temperatures. **Journal of Materials Science.** 46, 5192-5196.
71. Hasson, D.F., Hoover, S.M., Crowe, C.R., 1985. Effect of thermal treatment on the mechanical and toughness properties of extruded SiC/Aluminium 6061 metal matrix composites. **Journal Of Materials Science**, 20 (11), 4147-4154,
72. Unsworth, J.P., Bandyopadhyay, S., Effect Of Thermal Ageing On Hardness, 1994. Tensile and impact properties of an alumina microsphere-reinforced aluminium metal-matrix composite. **Journal of Materials Science**, 29 (17), 4645-4650.
73. Topcu, I., Gulsoy, H.O., Kadioglu, N., 2009. Gulluoglu, A.N., Processing and mechanical properties of B_4C reinforced al matrix composites. **Journal Of Alloys and Compounds,** 482(1), 516-521,
74. Kosedag, E., Ekici, R., 2019. Low-velocity impact performance of B_4C particle reinforced Al 6061 metal matrix composites. **Mater. Res. Express** 6 126556.

75. Callister, W. D. 1997. Materials science and engineering: An introduction. New York: John Wiley & Sons.
76. Asi, D.,2018, Polimer Matrisli Kompozit Malzemelerde İlave Olarak Kullanılan Parçacıkların Geometrisinin Kompozit Malzemelerin Fiziksel ve Mekaniksel Özelliklerine Etkisinin Araştırılması, Uşak Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Uşak.
77. Barbero, E. J., 2018. Introduction to Composite Materials Design, Third edition. CRC Press Taylor & Francis Group , New York, 37-102.
78. Chawla, K.K., 2011. Composite Materials Science and Engineering, Third Edition. Springer , New York, USA, 11-140.
79. Mazumdar, S. K., 2002. Composites Manufacturing Materials, Product, and Process Engineering. CRC Press, London, 23-51.
80. Şahin, Y., 2006, Kompozit Malzemelere Giriş, 2. Baskı. Seçkin Yayınevi, Ankara, 27-139.
81. Bakkal M., 2011, Kompozitler, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği, Sekizinci baskıdan çeviri, Kenan Genel, Nobel Yayınevi,Türkiye, 629-655.
82. Boyd, J. 2003. Vacuum Bag only Composite PartManufacturing (Tutorial Handout)(pp. 72).Dayton, OH: SAMPE 2003Technical Conference/Dayton, OH]
83. Danzi, M., Manufacturing of Polymer Composites OOA Prepreg Technology, Laboratory of Composite Materials and Adaptive Structures, ETH Zürich, April 2017.
84. Kösedağ, E , Ekici, R., 2019. Partikül takviyeli metal matrisli kompozitlerin darbe davranışları üzerine bir derleme. **Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi** 8: 384-393.
85. Aktaş, M. 2007. Temperature Effect on Impact Behavior of Laminated Composite Plates. Dokuz Eylül University, Doktora Tezi, İzmir, 136s.
86. Herup, E.J. 1996. Low-velocity impact on composite sandwich plates. Air University, PhD Thesis, United Satates of America, 363 s.
87. Sayer, M., 2009. Hibrit kompozitlerin darbe davranışlarının incelenmesi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Denizli.
88. Abrate, S., 1998. Impact on composite structures. Cambridge University Press, United Kingdom, 289 s.
89. Mili, F., and Necib, B. 2001, Impact behaviour of cross-ply laminated composite plates under low velocities. **Composite Structures,** 51: 273-244.
90. Shu, D.W., Zhou, W., and Ma, G. W. 2007. Tensile Mechanical Properties of AM50A Alloy by Hopkinson Bar. **Key Engineering Materials**, (340-341): 247-254.
91. Duchene, P., Chaki, S., Ayadi, A., 2018. A review of non-destructive techniques used for mechanical damage assessment in polymer composites. **Journal of Materials Science** 53, 7915–7938.
92. Shyr, T.W., Pan, Y. H. 2003. Impact resistance and damage characteristics of composite laminates. **Composite Structures**, 62: 193–203.

93. Wu, Q., Xu, W., Zhang, L., 2018. A micromechanics analysis of the material removal mechanisms in the cutting of ceramic particle reinforced metal matrix composites. **Machining Science and technology,** 22(4), 638-651.
94. Lee, M., Park, S., Jo, I., Lee, S. 2017. Analysis of metal matrix composite (MMC) applied armor system. *14th Hypervelocity Impact Symposium*, Canterbury, Kent, UK.
95. Banerjee, B., 2007.The mechanical threshold stress model for various tempers of AISI 4340 steel**. International Journal of Solids and Structures**. 44, 834–859.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı: Ertan KÖSEDAĞ
Uyruğu: Türkiye (T.C)
Doğum Tarihi ve Yeri: 27.03.1991 - Ağrı
Medeni Durum: Evli
e-mail: ekosedag@erciyes.edu.tr / ertan_kosedag@hotmail.com
Yazışma Adresi: Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Sekreterliği

EĞİTİM

Derece	Kurum	Mezuniyet Tarihi
Yüksek Lisans	Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü	2017
Lisans	Atatürk Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü	2013
Lise	Mehmet Kemal Tuncel Lisesi, Adana	2008

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görev
2017-Halen	Erciyes Üniversitesi	Araştırma Görevlisi
2014-2017	Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi	Araştırma Görevlisi

YABANCI DİL

İngilizce

YAYINLAR

1. Kosedag, E., Ekici, R., 2019. Low-velocity impact performance of B_4C particle-reinforced Al 6061 metal matrix composites. **Materials Research Express**, 6, 126556.

2. Kosedag, E., Ekici, R., 2019. Free vibration analysis of foam-core sandwich structures. **Journal of Polytechnic of Gazi University**. DOI: 10.2339/politeknik.571396.

3. Ekici, R., Kosedag, E., 2017. Comparison of the low-velocity impact behaviors of SiC and pumice particle-reinforced metal matrix composites. **International Journal of Mechanical and Production Engineering**, 5 (10), 101-105.

4. Kosedag, E., Ekici, R., 2019. Partikül takviyeli metal matrisli kompozitlerin darbe davranışları üzerine bir derleme. **Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi,** 8 (1), 384-393.

5. Kosedag, E., Aydogmus, T., 2016. The effect of ceramic and metallic reinforcement materials on the mechanical properties of magnesium matrix composites. *International Conference on Materials Science and Technology in Cappadocia*, Nevşehir, Turkey.

6. Kosedag, E., Aydogmus, T., 2017. Microhardness behavior of ın-situ magnesium / pumice composites with different reinforcement contents. *8th International Advanced Technologies Symposium (IATS'17)*, Elazıg, Turkey.

7. Kosedag, E., Aydogmus, T., 2017. The unusual reinforcement materials used in production of magnesium matrix ın-situ composites and usability of pumice. *8th International Advanced Technologies Symposium (IATS'17),* Elazıg, Turkey.

8. Kosedag, E., Aydogmus, T., 2018. Processing and characterization of pumice reinforced magnesium matrix composites. *3rd International Mediterranean Science and Engineering Congress (IMSEC 2018).* Adana, Turkey.

9. Kosedag, E., Aydogmus, T., 2018. High temperature mechanical properties of magnesium/pumice composites produced by powder metallurgy. *3rd International Mediterranean Science and Engineering Congress (IMSEC 2018).* Adana, Turkey.

10. Ekici, R., Kosedag, E., 2018. Effect of fibre orientation angle on the free vibration of composite sandwich beams with foam-core. *1st International Symposium on Light Alloys and Composite Materials (ISLAC'18).* Karabük, Turkey.

11. Kosedag, E., Çalışkan, U., Ekici, R., 2019. The effect of partıcle filling on impact behavior in glass fiber reinforced polymer matrıx composıtes. *9th Internatıonal European Conference on Mathematıcs, Engıneerıng, Natural Medıcal Scıences.* Bursa Turkey.

12. Guçlu, E., Kosedag, E., Ekici, R., Apalak, Z.G., 2019. Düşük hızlı darbenin metal matrisli kompozitlerin sertlikleri üzerindeki etkisi. *2. Uluslararası Erciyes Bilimsel Araştırmalar Kongresi*, Kayseri, Turkey.