



**KARBON FİBER KOMPOZİTLERİN VAKUM İNFÜZYON YÖNTEMİ İLE
ÜRETİMİ VE BALİSTİK ÖZELLİKLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ**

Burak ESENKAYA

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

HAZİRAN 2019

Burak ESENKAYA tarafından hazırlanan “KARBON FİBER KOMPOZİTLERİN VAKUM İNFÜZYON YÖNTEMİ İLE ÜRETİMİ VE BALİSTİK ÖZELLİKLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Ana Bilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Ramazan ÇITAK

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Başkan: Dr. Öğr. Üyesi Hanifi ÇİNİCİ

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Üye: Dr. Öğr. Üyesi Kubilay KARACİF

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Hitit Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Tez Savunma Tarihi: 26/06/2019

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Prof. Dr. Sena YAŞYERLİ

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Burak ESENKAYA

26/06/2019

KARBON FİBER KOMPOZİTLERİN VAKUM İNFÜZYON YÖNTEMİ İLE ÜRETİMİ VE BALİSTİK ÖZELLİKLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Burak ESENKAYA

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Haziran 2019

ÖZET

Kevlar ve karbon fiber kompozit malzemeler düşük yoğunluk ve yüksek mukavemet gibi üstün özelliklere sahip malzemelerdir. Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler ise zorlu çalışma ortamlarında, özelliklerini kaybetmeden ve bozulmadan çalışabilen gelişmiş mühendislik malzemelerdir. Bu çalışmada; kevlar, karbon fiber ve kevlar/karbon fiber esaslı polimer matrisli hibrit kompozitlerin vakum infüzyon yöntemi ile üretimi gerçekleştirilmiştir. Bu kompozitlerin çekme, eğme, basma ve hızlı darbe dayanımları incelenmiştir. Ayrıca $Al_{x231}/Al_{x231}+ \%50B_4C$, $Al_{x231}/Al_{x231}+ \%50SiC$ ve $Al_{x231}/Al_{x231}+ \%50Al_2O_3$ kompozitler toz metalurjisi yöntemi ile üretilmiştir. Bu kompozitlerin yoğunluk, sertlik ve çapraz kırılma dayanım özellikleri incelenmiştir. Kompozitlerin mikroyapıları ve kırık yüzeyleri optik ve taramalı elektron mikroskobu ile incelenmiştir. Polimer matrisli kompozit malzemelerde en yüksek delme dayanımının kevlar (ön) – karbon fiber (arka) kompozit malzeme olduğu gözlemlenmiştir. En iyi sonucu veren bu polimer matrisli kompozit malzeme, metal matrisli kompozit malzemeler ile yapıştırılarak bir araya getirilmiş ve balistik özellikleri araştırılmıştır. Yapıştırılarak bir araya getirilen polimer matrisli kompozit ve metal matrisli kompozit malzeme, 7.62x51mm mermilerle yapılan testlerde başarılı bir balistik özellik göstermiştir.

Bilim Kodu : 91512

Anahtar Kelimeler : Karbon fiber, Kevlar, B_4C , SiC , Al_2O_3 , Alumix 231, Balistik, Mekanik özellikler

Sayfa Adedi : 113

Danışman : Prof. Dr. Ramazan ÇITAK

PRODUCTION OF CARBON FIBER COMPOSITES BY VACUUM INFUSION
METHOD AND ASSESSMENT OF BALLISTIC PROPERTIES

(M. Sc. Thesis)

Burak ESENKAYA

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

June 2019

ABSTRACT

Kevlar and carbon fiber composite materials have superior properties such as low density and high strength. Functionally graded materials are advanced engineering materials that can operate in harsh working environments without losing their properties and degradation. In this study; kevlar, carbon fiber and kevlar/carbon fiber based polymer matrix hybrid composites were produced by vacuum infusion method. Tensile, bending, compression and fast impact strength of these composites were investigated. In addition, Al_x231/Al_x231+%50B₄C, Al_x231/Al_x231+%50SiC and Al_x231/Al_x231+%50Al₂O₃ composites were produced by powder metallurgy method. The density, hardness and cross fracture strength properties of these composites were investigated. The microstructures and fracture surfaces of the composites were examined by optical and scanning electron microscopy. It has been observed that the highest drilling strength in polymer matrix composite materials is in kevlar (front) - carbon fiber (back) composite material. This polymer matrix composite material, which gives the best results, was bonded with metal matrix composite materials and their ballistic properties were investigated. The polymer matrix composite and the metal matrix composite material, which were bonded together, showed successful ballistic properties in the tests carried out with 7.62x51mm projectiles.

Science Code : 91512

Key Words : Carbon fiber, Kevlar, B₄C, SiC, Al₂O₃, Alumix 231, Ballistic, Mechanical properties

Page Number : 113

Supervisor : Prof. Dr. Ramazan ÇITAK

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam süresince kıymetli vaktini ayırıp yardımını ve desteğini esirgemeyen, eğitimim süresince her anlamda katkıda bulunan değerli danışman hocam Prof. Dr. Ramazan ÇITAK'a teşekkür eder saygılarımı sunarım. Çalışmamın her sürecinde bana destek olan ve yardım eden değerli hocalarım Öğr. Gör. Dr. Halil KARAKOÇ'a ve Dr. Öğr. Üyesi Hanifi ÇİNİCİ'ye teşekkürü bir borç bilirim. Vakum infüzyon tekniği ile hibrit kompozit malzemelerin üretiminde sağlamış olduğu yer imkanlarından dolayı Dora Makina İmalat Sanayi ve Ticaret Ltd. Şti.'ye teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca tezimi 07/2018-16 kodlu proje ile desteklediği için Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi'ne teşekkür ederim. Son olarak araştırmam boyunca beni yalnız bırakmayan, her konuda bana destek olan aileme sevgi ve teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xi
RESİMLERİN LİSTESİ	xvi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xvii
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ÖZETİ	3
3. KOMPOZİT MALZEMELER.....	7
3.1. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması.....	8
3.2. Matris Malzemesine Göre Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması.....	9
3.2.1. Metal matrisli kompozitler (MMK)	9
3.2.2. Seramik matrisli kompozitler (SMK)	10
3.2.3. Polimer matrisli kompozitler (PMK)	10
3.3. Takviye Elemanına Göre Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması.....	11
3.3.1. Elyaf takviyeli kompozitler.....	12
3.3.2. Parçacık takviyeli kompozitler.....	13
3.4. Polimer Matrisli Kompozitlerde Matris Malzemeleri.....	13
3.4.1. Termoset reçineler.....	13
3.4.2. Termoplastik reçineler	14

	Sayfa
3.5. Polimer Matrisli Kompozitlerde Takviye Malzemeleri	15
3.5.1. Karbon fiber	16
3.5.2. Aramid fiber	18
3.6. Polimer Matrisli Kompozitlerin Üretimi.....	19
3.6.1. Vakum destekli reçine transfer kalıplama (VARTM).....	20
3.7. Kompozit Malzemelerin Kullanım Alanları	22
3.8. Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzemeler	25
3.8.1. Fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme türleri	28
3.8.2. Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerin üretim süreci	29
4. BALİSTİK.....	33
4.1. Hızlı Darbe Testi	33
4.2. Balistik Bilimi	35
5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	41
5.1. Malzeme ve Metot.....	41
5.1.1. Polimer matrisli kompozitlerin üretiminde kullanılan malzemeler	43
5.1.2. Metal matrisli kompozitlerin üretiminde kullanılan malzemeler.....	44
5.2. Kompozitlerin Üretimi	45
5.2.1. Polimer matrisli kompozitlerin üretimi	45
5.2.2. Metal matrisli kompozitlerin üretimi	49
5.3. Numunelerin Karakterizasyonu	51
5.3.1. Polimer matrisli kompozit numunelerin karakterizasyonu	51
5.3.2. Metal matrisli kompozit numunelerin karakterizasyonu.....	56
5.4. Balistik Test	59

	Sayfa
6. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA.....	65
6.1. PMK Numunelerin Çekme Test Sonuçları	65
6.2. PMK Numunelerin Eğme Test Sonuçları	68
6.3. PMK Numunelerin Basma Test Sonuçları	70
6.4. PMK Malzemelerin Hızlı Darbe Testi Sonuçları.....	71
6.5. MMK Lamine Malzemelerin Yoğunluk Değişimi.....	78
6.6. MMK Lamine Malzemelerin Optik Mikroskop Analizleri.....	79
6.7. MMK Lamine Malzemelerin SEM ve EDS Analizleri.....	82
6.8. MMK Lamine Malzemelerin Sertlik Değişimi	88
6.9. MMK Lamine Malzemelerin Çapraz Kırılma Dayanımları.....	89
6.10. MMK Lamine Malzemelerin Kırık Yüzeylerin Analizi	90
6.11. Balistik Test Sonuçları	96
7. SONUÇLAR.....	105
KAYNAKLAR	107
ÖZGEÇMİŞ	113

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.1. Genel silah kategorileri. Namlu enerjisi E_0 için standart değerler.....	36
Çizelge 5.1. Tenax-E HTA 40 3k Karbon fiber kumaş özellikleri	43
Çizelge 5.2. Twaron CT709 WR kevlar kumaş özellikleri.....	44
Çizelge 5.3. MGS LR160 epoksi reçine özellikleri	44
Çizelge 5.4. MGS LH160 sertleştirici özellikleri	44
Çizelge 5.5. MGS LR160 ve MGS LH160 için kürlenme şartları.....	44
Çizelge 5.6. Karışım tozlarının fiziksel özellikleri	45
Çizelge 5.7. Kompozit plaka üretiminde kullanılan malzeme miktarları	46
Çizelge 5.8. Kullanılan sarf malzemeleri.....	49
Çizelge 5.9. Value VE135N vakum pompası özellikleri	49
Çizelge 5.10. Üretilen numune adetleri	52
Çizelge 5.11. Balistik test yapılan levhasal kompozit malzemeler.....	61
Çizelge 5.12. 7,62x51mm (M80) normal fişek özellikleri.....	64
Çizelge 5.13. 9x19mm parabellum tabanca fişek özellikleri.....	64

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 3.1. Kompozit malzemelerin sınıflandırılması	9
Şekil 3.2. Kompozit malzemelerin sınıflandırılması	12
Şekil 3.3. Karbon fiber uygulamalarının pazardaki kullanım ve yıllık büyüme oranı ...	17
Şekil 3.4. Aramid liflerinin radyal olarak düzenlenmiş katlı yapısı	18
Şekil 3.5. Tipik bir VARTM prosesi: (a) VARTM işleminin şematik gösterimi, (b) Cam elyaf kumaş, soyma kumaşı, infüzyon filesi ve vakum torbası (alttan üste doğru), (c) Sızdırmazlık bantı, reçine boruları ve sarmal borular (yukarıdan aşağıya doğru), (d) Reçine infüzyonu sırasında kaydedilen fotoğraflar (soldan sağa).....	21
Şekil 3.6. Savaş uçaklarında fiber takviyeli kompozitlerin kullanım oranlarının değişimi	23
Şekil 3.7. Otomobillerde karbon fiber takviyeli kompozit kullanımı	24
Şekil 3.8. (a) fonksiyonel derecelendirilmiş malzemenin (b) geleneksel laminat kompozit malzemenin şematik gösterimi.....	27
Şekil 3.9. A ve B fazlarının ve geçiş bölgesinin gösterildiği iki fazlı FDM örneği.....	28
Şekil 3.10. Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemenin uygulama alanları	29
Şekil 3.11. Toz karışımlarının hazırlanması	31
Şekil 3.12. Üst üste konulmuş toz karışımı.....	31
Şekil 3.13. FDM üretimi için toz metalurjisi akış şeması.....	32
Şekil 4.1. Darbe tepkileri, (a) yüksek hızlı (balistik) darbe, çok kısa darbe sürelerinde gerçekleşen genleşmeli dalganın yüksek olduğu tepki; (b) orta hızlı darbe, kısa darbe süreleri ile bükülgen ve keskin dalganın yüksek olduğu tepki; (c) düşük hızlı darbe, uzun darbe süreleri ile yarı statik meydana gelen tepki	33
Şekil 4.2. En yaygın tabanca kalibreleri ve nominal namlu enerjileri	37
Şekil 4.3. En yaygın tabanca kalibreleri ve nominal namlu enerji yoğunlukları	37
Şekil 4.4. Merminin hedef üzerinde meydana getirdiği bazı hasar durumları	39

Şekil	Sayfa
Şekil 5.1. Deneysel çalışmalarda yapılan işlemlerin akış sırası.....	42
Şekil 5.2. (a) Karbon fiber kumaş numunesi, (b) Kevlar kumaş numunesi.....	43
Şekil 5.3. 3 farklı tipte üretilen kompozit malzemenin şematik gösterimi	46
Şekil 5.4. Vakum infüzyon yöntemi ile kompozit malzemelerin üretilmesi	47
Şekil 5.5. (a) Turbula T2 F tipi üç boyutlu toz karıştırıcı, (b) Ağırlıkça %50 oranında B_4C , SiC ve Al_2O_3 içeren karışım tozlar	50
Şekil 5.6. Sıcak presleme yöntemi ile lamine kompozit malzemelerin üretilmesi	51
Şekil 5.7. ASTM D3039 standardındaki çekme test numunesinin şematik gösterimi ...	52
Şekil 5.8. Çekme test düzeneği	53
Şekil 5.9. ASTM D790 standardındaki eğme test numunesinin şematik gösterimi	53
Şekil 5.10. Eğme testi düzeneği	54
Şekil 5.11. ASTM D3410 standardındaki basma test numunesinin şematik gösterimi..	54
Şekil 5.12. Basma test düzeneği	55
Şekil 5.13. (a) EMCO TEST Duravision 200 marka sertlik ölçüm cihazı, (b) üretilen kompozit numunelerin sertlik alınan bölgeleri	57
Şekil 5.14. (a) $Al_{x231}/Al_{x231}+ \%50B_4C$, (b) $Al_{x231}/Al_{x231}+ \%50SiC$, (c) $Al_{x231}/Al_{x231}+ \%50Al_2O_3$ mekanik test numunelerin ön ve arka yüzlerinden alınan görüntüler	58
Şekil 5.15. Çapraz kırılma testinin şematik olarak gösterimi	59
Şekil 5.16. Lamine hibrid balistik test numuneleri (a) 1. Tip, (b) 2. Tip, (c) 3. Tip (d) kevlar/karbon fiber hibrid kompozit	60
Şekil 5.17. Balistik test numuneleri	60
Şekil 5.18. Atış poligonuna ait görünüm	62
Şekil 5.19. Makine kimya endüstrisi kurumu atış poligonunun şematik olarak gösterimi (a) MPT-76 Milli Piyade Tüfeği ile atış (b) MP5-A3 Makinalı Tabanca ile atış.....	63
Şekil 5.20. (a) 7,62 mm x51 (M80) normal fişek ve (b) 9 mmx19 parabellum tabanca fişegi.....	63

Şekil	Sayfa
Şekil 6.1. Üretilen kompozitlerin akma dayanım değerleri	65
Şekil 6.2. Üretilen kompozitlerin % uzama değerleri.....	66
Şekil 6.3. Üretilen kompozitlerin kopma dayanım değerleri	67
Şekil 6.4. Çekme test sonrası kırılan numuneler.....	68
Şekil 6.5. Eğme testi sonrası makro resimler	68
Şekil 6.6. Üretilen kompozitlerin eğilme dayanım değerleri	69
Şekil 6.7. Üretilen kompozitlerin eğilme gerinim değerleri	69
Şekil 6.8. Üretilen kompozitlerin maksimum basma dayanım değerleri.....	70
Şekil 6.9. Basma test sonrası makro resimler	71
Şekil 6.10. Hızlı darbe test numuneleri.....	72
Şekil 6.11. Polimer matrisli kompozit plakaların farklı darbe enerjilerindeki tipik kuvvet-zaman eğrileri	73
Şekil 6.12. Polimer matrisli kompozit plakaların farklı darbe enerjilerindeki tipik enerji-zaman eğrileri	74
Şekil 6.13. Polimer matrisli kompozit plakaların farklı darbe enerjilerindeki tipik çökme-zaman eğrileri.....	75
Şekil 6.14. Polimer matrisli kompozit plakaların 240 J darbe enerjisindeki maksimum yer değiştirme oranları	76
Şekil 6.15. Karbon fiber (ön) – kevlar (arka) kompozit malzemelerin delme test sonrası makro görüntüleri	77
Şekil 6.16. Kevlar (ön) – karbon fiber (arka) kompozit malzemelerin delme test sonrası makro görüntüleri	78
Şekil 6.17. Üretilen kompozit malzemelerin yoğunluk grafikleri	79
Şekil 6.18. Sıcak presleme sonrası elde edilen lamine kompozit malzemelerin 100x ve 500x büyütme ile çekilen mikroyapı görüntüleri	81
Şekil 6.19. Sıcak presleme sonrası Alumix231 malzeme yüzeyinden alınan haritalama görüntüsü.....	82

Şekil	Sayfa
Şekil 6.20. Alumix231/Alumix231+%50B ₄ C lamine kompozit malzemenin (a) SEM resmi ve EDS analizi alınan bölgeler, (b) 1. bölgenin, (c) 2. Bölgenin EDS analizi	83
Şekil 6.21. Alumix231/Alumix231+%50B ₄ C lamine kompozit malzemenin seramik parçacık takviyeli, ara geçiş ve takviyesiz tarafından alınan SEM resimleri	84
Şekil 6.22. Alumix231/Alumix231+%50SiC lamine kompozit malzemenin (a) SEM resmi ve EDS analizi alınan bölgeler, (b) 1. bölgenin, (c) 2. Bölgenin, (d) 3. bölgenin EDS analizi	85
Şekil 6.23. Alumix231/Alumix231+%50SiC lamine kompozit malzemenin seramik parçacık takviyeli, ara geçiş ve takviyesiz tarafından alınan SEM resimleri	86
Şekil 6.24. Alumix231/Alumix231+%50Al ₂ O ₃ lamine kompozit malzemenin (a) SEM resmi ve EDS analizi alınan bölgeler, (b) 1. bölgenin, (c) 2. bölgenin EDS analizi	87
Şekil 6.25. Alumix231/Alumix231+%50Al ₂ O ₃ lamine kompozit malzemenin seramik parçacık takviyeli, ara geçiş ve takviyesiz tarafından alınan SEM resimleri	87
Şekil 6.26. Üretilen kompozit malzemelerin sertlik değişim grafikleri.....	89
Şekil 6.27. Üretilen kompozit malzemelerin çapraz kırılma dayanım grafiği.....	89
Şekil 6.28. Çapraz kırılma test sonrası Alumix231/Alumix231+%50B ₄ C kompozit malzemenin ara geçiş bölgesinden alınan (a) SEM resmi (b) 1 numaralı bölgenin EDS sonucu.....	91
Şekil 6.29. Çapraz kırılma test sonrası Alumix231/Alumix231+%50B ₄ C kompozit malzemenin kırık yüzeyinden alınan SEM resimleri.....	92
Şekil 6.30. Çapraz kırılma test sonrası Alumix231/Alumix231+%50SiC kompozit malzemenin ara geçiş bölgesinden alınan (a) SEM resmi (b) 1 numaralı bölgenin (c) 2 numaralı bölgenin EDS sonucu	93
Şekil 6.31. Çapraz kırılma test sonrası Alumix231/Alumix231+%50SiC kompozit malzemenin kırık yüzeyinden alınan SEM resimleri.....	94
Şekil 6.32. Çapraz kırılma test sonrası Alumix231/Alumix231+%50Al ₂ O ₃ kompozit malzemenin ara geçiş bölgesinden alınan (a) SEM resmi (b) 1 numaralı bölgenin (c) 2 numaralı bölgenin EDS	95
Şekil 6.33. Çapraz kırılma test sonrası Alumix231/Alumix231+%50Al ₂ O ₃ kompozit malzemenin kırık yüzeyinden alınan SEM resimleri.....	96

Şekil	Sayfa
Şekil 6.34. Vakum infüzyon yöntemi ile üretilen kevlar karbon fiber kompozit levhalara MP5 tüfeği ile 9x19 mm'lik mermiyle yapılan atış sonrası görünümleri.....	97
Şekil 6.35. Alumix231/Alumix231+%50B ₄ C, kevlar/karbon fiber ve Al5083 malzemelerin birleştirilmesi ile elde edilen kompozit sistemin 7,62x51 mm mermiler karşısındaki balistik testi.....	99
Şekil 6.36. Alumix231/Alumix231+%50SiC, kevlar/karbon fiber ve Al5083 malzemelerin birleştirilmesi ile elde edilen kompozit sistemin 7,62x51 mm mermiler karşısındaki balistik testi.....	101
Şekil 6.37. Alumix231/Alumix231+%50Al ₂ O ₃ , kevlar/karbon fiber ve Al5083 malzemelerin birleştirilmesi ile elde edilen kompozit sistemin 7,62x51 mm mermiler karşısındaki balistik testi.....	102
Şekil 6.38. Kompozit sistemlerin balistik test sonrası Al5083 levhada oluşan hasarı....	103
Şekil 6.39. Kompozit sistemlerin balistik test sonrası penetrasyon derinliği ve çökme miktarı	104

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 3.1. Fiber kompozit malzeme çeşitleri.....	8
Resim 3.2. Dokuma karbon fiber kumaş	16
Resim 3.3. Tekne gövdesinin el yatırması yöntemiyle üretimi	25
Resim 5.1. Vakum infüzyon ünitesi resmi.....	48
Resim 5.2. Hızlı darbe test cihazı	55
Resim 5.3. (a) Leica DM4000M optik mikroskop, (b) JEOL JSM 6060LV marka taramalı elektron mikroskobu	57

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler

Açıklamalar

μm	Mikron
°	Derece
°C	Derece santigrat
cm^3	Santimetreküp
g	Gram
GPa	Gigapaskal
MPa	Megapaskal
mm	Milimetre
N	Newton
h	Saat

Kısaltmalar

Açıklamalar

2B	İki boyutlu
3B	Üç boyutlu
AFRP	Aramid elyaf takviyeli polimer
CFRP	Karbon elyaf takviyeli polimer
FRP	Elyaf takviyeli polimer
GFRP	Cam elyaf takviyeli polimer
MMK	Metal matrisli kompozit
MMKL	Metal matrisli kompozit lamine
PE	Polietilen
PEI	Polieterimid
PMK	Polimer matrisli kompozit
PP	Polipropilen
RIM	Reaksiyonlu enjeksiyon kalıplama
RTM	Reçine transfer kalıplama

Kısaltmalar**Açıklamalar****SEM**

Taramalı elektron mikroskobu

SFRP

Kısa elyaf takiyeli polimer

SMK

Seramik matrisli kompozit

TM

Toz metalurji

VARTM

Vakum destekli reçine transfer kalıplama



1. GİRİŞ

Tarih boyunca insanlar dışarıdan gelen saldırılara karşı sürekli olarak kendilerini koruma çabası içinde olmuşlardır. Zaman içerisinde çeşitli koruyucu zırhlar üretilmiş ve günümüze kadar gelişimleri durmaksızın devam etmiştir. Bunun sonucunda, balistik bilimi bugünkü konumuna ulaşmıştır. Balistik kelimesi Fransızca “balistique” sözcüğünden gelmektedir. Bir merminin silahtan çıkarak hedefe ulaşmasını, atışın yapıldığı ortamdaki değişkenlere bağlı olarak hareketlerinin değişimini, hedefe çarptıktan sonraki enerjinin absorbe edilmesini ve oluşan deformasyon davranışlarını inceleyen bilim dalıdır. Balistik bilimi çalışma konularına göre iç balistik, dış balistik ve terminal balistik olmak üzere 3’e ayrılır. İç ve dış balistik, merminin namlu içerisindeki davranışını ve havada bulunduğu sıradaki hareketlerini inceler. Terminal balistikte ise hedefe çarpan mermide ve hedefte oluşan deformasyonlar incelenir. Bundan dolayı, zırh tasarımı, zırhın karakteristiği ve deformasyon alanlarının araştırılması terminal balistiğin konusu içinde yer alır (Sözen, 2016; Yumak, 2013).

Karbon liflerinin bilinen en eski ticari kullanımı akkor lamba filamanları için pamuk ve bambu liflerinin karbonizasyonu şeklindeydi. 1879’da Thomas Edison, ilk kez akkor olarak adlandırılan ince bir malzeme bandını ısıtmak için elektrik kullanan akkor ampul deneylerinde karbon fiber filamanlarını kullanmıştır. 1880 yılında karbon lifleri keşfedilmiş ve elektrik lambası için filaman malzemesi olarak karbon fiberlerin kullanımı patentlenmiştir. Birleşmiş Karbür Kuruluşu, Rayon ve Poliakrilonitril (PAN) öncü fiberlerden yüksek mukavemetli ve yüksek modüllü karbon fiberleri sırasıyla 1959 ve 1962’de geliştirmiştir. 1963’te ise yüksek modüllü özelliklere sahip zift-türevli karbon fiberler icat edilmiştir. Günümüze kadar, poliesterler, poliamidler, polivinil alkol, poliviniliden ve fenolik reçineler gibi pek çok öncü malzeme karbon elyaf üretimi için araştırılmıştır. Edison tarafından karbon filamanlarının icadı, sentetik liflerden karbon fiberlerin üretilmesi için geliştirilen yöntemin yaklaşık bir yüzyıl önceden yolunu açmıştır (Edison, 1880; Park, 2015).

Metal zırhlar arasında özellikle çelik, iyi mekanik özellikleri nedeniyle çok geniş kullanım alanına sahiptir ve halen kullanılmaktadır. Günümüzde metallerin diğer malzemelere göre nispeten yüksek yoğunluklu kalması nedeniyle yerlerini çoğunlukla, metaller kadar

dayanıklı ancak daha hafif olan kompozit zırhlar almıştır. Hali hazırda bulunan kompozit malzemelere daha üstün özellikler kazandırmak amacıyla vakum infüzyon gibi yeni üretim metodları geliştirilmekte ve böylece istenilen mekanik özelliklerde ve daha hafif zırhlar geliştirilebilmesi mümkün olmaktadır.

İmalat teknolojisi, gelişen teknolojiye paralel bir davranış göstermekte olup üretimde kalite ve ekonomi en çok aranan özelliklerdir. Bu amaçla, endüstrideki uygulayıcılar imalatta mümkün olan bütün seçenekleri kullanma çabası içine girmişlerdir. Bu çalışmada; vakum infüzyon yöntemiyle üretilen karbon fiber ve kevlar takviyeli polimer matrisli kompozit malzemenin mekanik özellikleri ve balistik performansının incelenmesi amaçlanmıştır.



2. LİTERATÜR ÖZETİ

Randjbaran ve diğerleri (2014), Yaptıkları çalışmada, yüksek hızdaki çarpma koşullarında balistik test yaparak, hibrid kompozit malzeme tabakalarının istiflenme sıralarının etkilerinin araştırılması için kolay bir yöntem sunmuşlardır. Numuneler; kevlar, karbon ve cam dokuma kumaşlardan ve reçineden üretilmiş, darbe koşulları altında deneysel olarak araştırılmıştır. Sonuçlar, birinci katın cam elyaf ile istiflenmesinin, balistik için kevlar elyafı kullanmaktan daha iyi olduğunu göstermektedir. Karbon ve cam elyaf kombinasyonu kullanımının orta tabakalarda daha verimli olduğunu ve karbon fiberin son tabakada kullanılmasının uygun olmadığını gözlemlemişlerdir.

Bandaru ve diğerleri (2015), Yaptıkları çalışmada hibrid kompozit zırhlar üzerindeki balistik çarpma etkisini simülasyonlar kullanılarak araştırmışlardır. Hibrit kompozit zırh, çeşitli elyaf takviyeli kompozitlerin kombinasyonları ve istifleme sıralarını kullanılarak üretilmiştir. Simülasyonlar ile sabit kalınlıktaki hibrid kompozit zırhın, tabakalarının istiflenme sırasının balistik performans üzerinde önemli bir etkisi olduğunu gözlemlemişlerdir. Sonuçlar ayrıca balistik limit hızının mermi geometrisine duyarlı olduğunu göstermektedir. Spesifik olarak, kevlar fiber laminat içerisinde karbon fiber katmanı içeren hibrit kompozit zırhın maksimum darbe direncini elde ettiğini gözlemlemiş ve çalışılan diğer kombinasyonlarla karşılaştırıldığında tasarım için en iyi seçim olduğunu bulmuşlardır.

Yahaya ve diğerleri (2014), Yaptıkları çalışmada, 3,1 mm'den 10,8 mm'ye kadar kalınlıklarda dokumasız kenaf elyaf/kevlar epoksi hibrid laminatların penetrasyon ve balistik özelliklerini deneysel olarak incelenmiştir. Hibrit kompozitler, üç farklı konfigürasyonda; en iç katmanlarda, en dış tabakalarda ve değişken tabakalarda, kevlar tabakaları ve dokumasız kenaf tabakalarından oluşmaktalar. Kenaf/epoksi ve kevlar/epoksi kompozitlere kıyasla, melez kompozitlerde penetrasyonu başlatmak için maksimum kuvvet daha yüksektir. Kenaf-kevlar'ın melezlenmesi, emilen enerji (penetrasyon) ve maksimum yük açısından olumlu bir etki yaratmıştır. Balistik testlerde, hibrid kompozitler kevlar/epoksi kompozitinden daha düşük balistik limit (V50) ve enerji emilimi göstermiştir. En dış katmanlarda kenaf ile hibrit kompozitlerin V50 değerinin diğer hibrit kompozitlerden daha üstün olduğunu bulmuşlardır.

Pandya ve diğerleri (2012), Melez kompozitlerin balistik çarpma davranışları üzerinde durmuşlardır. Malzemeler, düz örgü E-cam kumaş ve epoksi reçine ile 8H saten örgü T300 karbon kumaş kullanılarak yapılan dört simetrik hibrid kompozit türüdür. Aynı laminat kalınlığı için sadece karbon kompozitlerle karşılaştırıldığında T300 karbon katmanlarına E-cam tabakaları katılarak yapılan kompozitlerin balistik limit hızını arttırılabileceğini görmüşlerdir. E-cam katmanlarının dışarıya ve karbon katmanlarının içeriye yerleştirildiği durumun, aynı hedef kalınlık için dışta karbon katmanları yerleştirildiği durumdan daha yüksek balistik limit hızları sağladığını bulmuşlardır.

Srinivasa ve diğerleri (2010), CFRP kompozit malzemeyi gerilme, basma ve eğilme yüklerinde test etmiş ve kırılmış kompozit yüzeylerde taramalı elektron mikroskobu (SEM) yardımıyla mikroskobik çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada, kırığın doğası ve kökenine dair bilginin yanı sıra, kırığın çeşitli karakteristik özellikleri, bunların çatlak yayılma doğrultusu ve kırılma modları üzerindeki etkisi ile nasıl ortaya çıktığını anlamaya da çalışmışlardır.

Safri ve diğerleri (2017), Yaptıkları çalışmada, yapısal özelliklerinin iyileştirilmesi amacıyla üretilen hibrid kompozitlerin darbe özelliklerini incelemiş ve özellikle doğal ve sentetik liflerle güçlendirilmiş hibrid kompozitlerin darbe dayanımı ve penetrasyon davranışı ile bunların modern yapısal uygulamalar için uygunluğu üzerinde durmuşlardır. Sentetik-sentetik fiber hibrid kompozitlerin, metal malzemelere kıyasla yüksek spesifik malzeme özellikleri sağlayabileceğini keşfetmişlerdir.

Sorrentino ve diğerleri (2015), Yaptıkları çalışmada, reçine ile kevlar 29 kumaşlardan oluşan kompozit zırhların performansını ve balistik limit hızını tahmin etmek için bir analitik modelin güvenilirliğini değerlendirmeyi amaçlamışlardır. Üretilen zırhları, V50 balistik limit testlerine tabi tutmuşlardır. Aynı zamanda, deneysel testlerin sonuçlarını, incelenen kompozit zırhların balistik limit hızını öngörmek için bir literatür modelini doğrulamak amacıyla analitik balistik limitlerle karşılaştırılmışlardır. Balistik test sonuçları ile teknolojik sürecin ve zırh üretmek için kullanılan malzemelerin iyi balistik performanslar sağladığını ve balistik limitlerin analitik model tarafından tahmin edilenlerden yaklaşık %8 daha yüksek olduğunu doğrulamışlardır. Deneysel testlerin sonuçlarını Walker modeli ile kıyaslamış ve Walker'in modelinin, kabul edilen kompozit zırhların balistik limit hızını öngörmek için kullanılabileceğini gözlemlemişlerdir.

Kurzawa ve diğerkleri (2018), Yaptıkları çalışmada, yeni geliştirilen alüminyum matrisli metal seramik kompozitlerin darbe dayanımını incelemek üzere 5,56×45mm kalibreli mermi ile atış yapmışlardır. Bu amaçla Al₂O₃ parçacıkları ile güçlendirilmiş AC-44200 alaşımı temelli malzemeleri döküm yöntemi kullanılarak üretmişlerdir. Balistik direnci, % 20 hacim ve % 40 hacimdeki Al₂O₃ partikülleri ve takviyesiz matris atış malzemesi arasında karşılaştırmışlardır. Kompozit malzemelerin atış numuneleri, atış sonrası parçalanma oluşumu mekanizmasının açıklanması için kapsamlı metalografik analizlere tabi tutulmuştur. Testler ve analizler sonucunda, zırh koruma yapılarının yapımında Al₂O₃ parçacıkları ile güçlendirilmiş alüminyum kompozitlerin uygulama olanakları üzerinde sonuçlar çıkarmışlardır.

Aydın ve diğerkleri (2016), Yaptıkları çalışmada, alüminyum ve silisyum karbür bileşenlerinden oluşan fonksiyonel olarak derecelendirilmiş sandviç plakaların (FGSP) balistik performansı deneysel olarak incelenmişlerdir. Toz istifleme sıcak presleme yöntemi ile üretilen FGSP'lerin balistik testlerini, 9mm Parabellum mermileri kullanılarak gerçekleştirilmişlerdir. Dört tip plaka, Al6061, metal açısından zengin bileşim ($n=0,1$), doğrusal bileşim ($n=1$) ve seramik bileşimi ($n=10$) üretmişler ve karşılaştırmışlardır. Balistik test sonuçları, numune plakalarının hiçbirinin tam bir penetrasyona uğramadığını gösterdi. Her bir numunenin hasar ve deformasyon araştırmasıyla, kalınlıktaki bileşim değişiminin balistik performansı önemli ölçüde etkilediğini ortaya çıkarmışlardır.

Pol ve diğerkleri (2018), Yaptıkları çalışmada, TiB₂ ve B₄C seramik takviye parçacıklarını farklı oranlarda birleştirerek ürettikleri kompozitleri AA7005 alaşımının yüzeyine koyarak balistik direncini arttırmayı amaçlamışlardır. TiB₂ ve B₄C parçacıklarının farklı karışım oranlarına sahip kompozitleri, sürtünme karıştırma işlemiyle işlemişlerdir. Kompozitlerinin balistik özelliklerini değerlendirmek için mikro sertlik ve penetrasyon testleri yapmışlardır. Kompozitin yüzey sertliğinin baz alaşımından yaklaşık 70 HV daha yüksek olduğunu bulmuşlardır. Çelik merminin penetrasyon derinliği, baz alaşımında 37 mm'ye kıyasla kompozitlerde 20-26 mm arasında değişkenlik göstermiştir. Yüzey kompozitinin balistik kütle verimliliği faktörünün baz alaşımından 1,6 kat daha yüksek olduğunu bulmuşlardır. Bu çalışmada, sürtünme karıştırma işlemiyle imal edilen yüzey kompozitinin, alüminyum alaşımlarının balistik direncini arttırmada etkili bir yöntem olduğu göstermişlerdir.

Karamış ve diğerleri (2009), Yaptıkları çalışmada, iki tip lamine metal matris kompozit (MMC) örneği üretmişlerdir. Balistik performanslarını değerlendirmek için deformasyon davranışlarını araştırmışlardır. Bu lamine numuneler, MMC alt katmanları ve güçlendirilmemiş Al katmanları içerir. MMC alt katmanları, partikül Al_2O_3 takviyeli AA2024 alüminyum alaşımlarından üretilen MMC tabakalarıdır. Bu katmanları döküm ve sıcak presleme teknikleri kullanılarak üretmişlerdir. Aynı teknikleri kullanarak A tipi ve B tipi olarak güçlendirilmemiş AA2024 alüminyum alaşımı tabakaları ile lamine etmişlerdir. Balistik testleri 7,62×51mm'lik bir zırh delici mermiyle gerçekleştirdiler ve hedeflerin balistik çarpmalara verdiği cevapları, mermiler tarafından oluşturulan delik yüzeyinin incelenmesiyle değerlendirdiler. A tipi ve B tipi lamine yapılar farklı başarısızlık mekanizmaları gösterdi. A tipi hedefin deliğinin her iki tarafında derin kraterler meydana gelirken, B tipi hedefler için sırasıyla giriş ve çıkışta çıkıntı ve kabarmalar meydana geldiğini gözlemlemişlerdir.

3. KOMPOZİT MALZEMELER

Kompozit malzemeler, iki veya daha fazla materyalin bir kombinasyonu olup, istenen belirli özellikler veya geliştirilmiş özelliklere sahip heterojen malzemelerdir. Bir kompozit malzemede, süreksiz bileşen takviye olarak adlandırılır ve takviyeyi çevreleyen sürekli yapıya matris denir. Aynı malzeme ile yapılmış, ancak farklı formlarda bazı kompozitler de bulunmaktadır. Bunlara birkaç örnek; silisyum karbür elyaf takviyeli silikon karbür ve karbon fiber takviyeli karbon kompozitlerdir. Uygulamada, çoğu kompozit malzeme bir matris malzemesi ve esasen matrisin sağlamlığını ve sertliğini arttırmak için eklenen bir çeşit takviye içermektedir. Bu takviye genellikle lif halindedir. Günümüzde, insan yapımı kompozitler üç ana gruba ayrılabilirler. Bunlar, polimer matrisli, metal matrisli ve seramik matrisli kompozitlerdir (Rana, 2016; SP Systems, 2017).

Polimer matrisli kompozit malzemelerde; kullanılan reçineler matris malzemesi olarak, fiberler ise takviye malzemesi olarak görev yapmaktadır. Kompozit malzemenin içerisindeki fiberler ve reçine bir ara yüzey ile birbirlerine bağlanırlar. Kullanılan matris ve takviye ile malzeme istenen mekanik özellikler ve görünüm gibi özelliklere kavuşabilmekte ve çoğu şartı karşılayabilecek uygun bir takviye matris çifti oluşturulabilmektedir (Bayraktar, 2016).

Kompozit malzemelerin geleneksel malzemelere göre birçok avantajı vardır. Kompozitlerin çoğu hafif malzemelerle yapılmasına rağmen mekanik özellikleri önemli ölçüde yüksektir. Bu nedenle, kompozitlerin özgül mukavemet ve modül değerleri de oldukça yüksektir. Çok iyi ısı iletkenlik, korozyon direnci ve boyutsal kararlılığa sahiptirler ve hava koşullarına karşı dayanıklıdırlar. Uygun bir takviye ve matris malzemesi seçimi ile nihai bileşenden istenen özellikleri elde etmek mümkündür. Lifler takviye olarak kullanıldığında, takviyenin istenilen yönde hizalanmasıyla yön özelliklerine sahip bir kompozit elde edilebilir. Resim 3.1’de gösterilen fiber takviyeli kompozit malzemeler, farklı yönlerde farklı özellikler gerektiren yapılar için çok yararlıdır (Rana, 2016).



Resim 3.1. Fiber kompozit malzeme çeşitleri (AL-Oqla, 2017)

3.1. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Mevcut PMK'lerin alanının net bir sınıflandırma grubunda tanımlanması zor olsa da, kompozitlerin çeşitliliği Şekil 3.1'de gösterilmektedir. Şekilde, birçok kompozit sınıfın mevcut olduğu ve belirli bir kompozit malzemenin doğru bir şekilde tanımlanması için çeşitli anahtar sözcüklerin gerekli olduğu görülmektedir. Elyaf uzunluğu, oryantasyonu ve çapı, fiber takviyeli kompozitler için önemli parametrelerdir. Parçacık takviyeli kompozitler ayrıca parçacık şekli, gözeneklilik konfigürasyonu ve dağılımı bazında çeşitli sınıflara sahiptir. Bir kategoride ele alınamayan, birden fazla tipte takviye içeren çok fazlı kompozitler de vardır (Poveda, 2016).



Şekil 3.1. Kompozit malzemelerin sınıflandırılması (Poveda, 2016)

3.2. Matris Malzemesine Göre Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Matris malzemesine göre kompozit malzeme çeşitleri aşağıda belirtilmiştir;

- Metal matrisli kompozitler
- Seramik matrisli kompozitler
- Polimer matrisli kompozitler

3.2.1. Metal matrisli kompozitler (MMK)

Metal matrisli kompozitler, polimer matrisli kompozitlere kıyasla daha yüksek çalışma sıcaklığı gerektiren uygulamalar için kullanılırlar. Bu alaşımların çoğu, özellikle havacılık endüstrisinde kullanılmak üzere geliştirilmiştir; ancak, otomobil motor parçaları, fren kampanaları, fren balataları gibi otomobil endüstrisinde modern uygulamalarda da kullanılmaktalar. Sürekli lifler, metal matrisli kompozitler için en yüksek sertlik ve mukavemeti sağlar. Süreksiz ve parçacık takviyeli metal matrisli kompozitler, metal

alaşımlar üzerinde daha yüksek mukavemet, sertlik ve daha iyi boyutsal kararlılık sağlarlar. Bu alaşımlar günümüzde pahalı olmalarına rağmen, spor ekipmanları, otomobil motor parçaları, füze kılavuz parçaları vb. için kullanılmaktalar (Krishnaraj, 2013).

3.2.2. Seramik matrisli kompozitler (SMK)

Seramik malzemeler metaller ve metal olmayanlar arasında yer alan bileşiklerdir. Daha iyi mekanik özelliklere ve yüksek sıcaklık direncine sahip olan bileşiklerdir. Genellikle, metallerin oksitleri, karbürleri ve nitritleridir. Seramik malzemeler, yüksek spesifik modüle, yüksek sıcaklıklara dayanıma ve yüksek mekanik özelliklere sahip olduklarından, kompozit olarak kullanılmalarının temel amacı kırılma dayanıklılığını arttırmaktır. Sürekli lifler, süreksiz lifler veya parçacık takviye malzemesi olarak kullanılabilirler. SMK'lerde yaygın olarak kullanılan malzemelerden bazıları alümina, silisyum karbür, silisyum nitrid, cam ve çimentodur (Krishnaraj, 2013; Rana, 2016).

3.2.3. Polimer matrisli kompozitler (PMK)

Polimer matrisli kompozitler, düşük maliyetleri, yüksek mukavemetleri ve basit üretim teknikleri nedeniyle en yaygın kullanılan ileri kompozit türüdür. Bu kompozitler, küçük çaplı liflerle güçlendirilmiş polimerlerden oluşur. PMK'ler üç farklı kategoriye ayrılabilir. Gruplama, büyük ölçüde, kompozit matriste kullanılan fiber takviye tipine dayanmaktadır. Her tip polimer matrisli kompozit için çeşitli polimerler kullanılabilir. Üç grup; cam elyaf takviyeli polimer (GFRP), karbon fiber takviyeli polimer (CFRP) ve aramid elyaf takviyeli polimer kompozitlerdir (AFRP). Cam elyaf takviyeli plastikler, nispeten yüksek özgül mukavemet ve düşük maliyetleri nedeniyle en çok kullanılan malzemelerdir. Diğer malzemeler daha yüksek özgül mukavemete ve daha yüksek sertliğe sahiptirler. Ancak, pahalıdır ve maliyetin önemli olmadığı performans amaçlı uygulamalarda kullanılırlar. Mukavemet ve hafifliğin önemli olduğu, fakat sertlik ve yüksek sıcaklık performansının önemli olmadığı yerlerde, karbon yerine aramid kullanılır. Polimer matrisli kompozitlerin maksimum kullanılabilir sıcaklıkları nispeten düşüktür, çünkü matris materyalleri orta sıcaklıklarda yumuşamaya veya kimyasal ayrışmaya eğilimlidir (Krishnaraj, 2013).

Polimer matrisli kompozit malzemelerin bazı avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır. Bu malzemelerin sunduğu avantajlar:

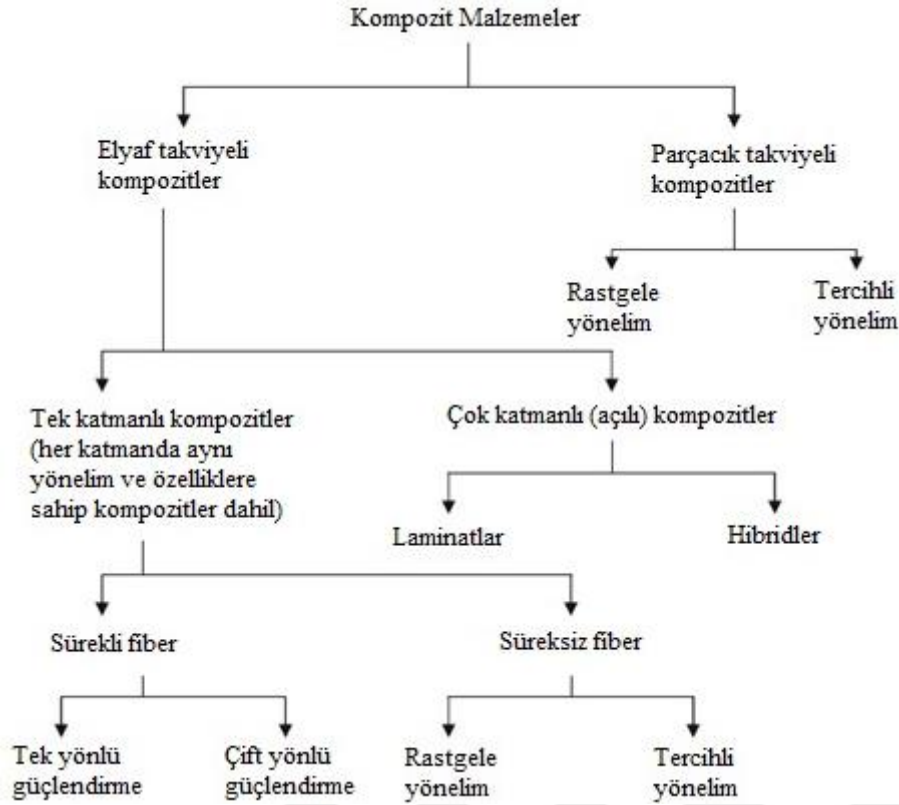
- Hafiflik,
- Yüksek darbe dayanımı,
- Kimyasal korozyon direnci,
- Yüksek özgül mukavemet ve yorulma ömrü,
- İyi elektrik ve ısı yalıtımı,
- Onarımları mümkündür,
- Karmaşık şekilli parçalar kolaylıkla imal edilebilir,
- Yapısal özellikler uygulama için uyarlanabilir,
- Üretim ekipmanları metalik malzemelerden daha düşük basınçlarda çalışır (Sapuan, 2017).

Bu avantajların yanında polimer matrisli kompozit malzemelerin bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Bunlar:

- Süneklikleri nispeten düşüktür,
- Anizotropiktirler (özellikler yöne bağlıdır),
- İmalatın proseslerine bağlı olarak parçaların özelliklerinde değişim mevcuttur,
- Çözücüler ve nem ile bozunurlar,
- Hammadde maliyeti yüksektir,
- Kürleme işlemi sırasında çekmeden kaynaklanan artık gerilmeler bulunur,
- Lif yönünde çatlak yayılması gerçekleşir (Sapuan, 2017).

3.3. Takviye Elemanına Göre Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Takviye elemanları arasında lifler, istenen koşulları sağladıkları ve özelliklerini etkileyen ve zenginleştiren matris bileşenlerine kuvvet aktardıkları için en önemli takviye sınıfıdır. Elyaf takviyeli kompozitlerin performansı; liflerin uzunluğu, şekli, yönelimi, bileşimi ve matrisin mekanik özellikleri ile değerlendirilmektedir. Takviye elemanına göre kompozitler malzemelerin sınıflandırılması Şekil 3.2’de gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Kompozit malzemelerin sınıflandırılması (Kar, 2017)

3.3.1. Elyaf takviyeli kompozitler

Kompozit malzemelerin metaller üzerindeki başlıca avantajı, yüksek özgül mukavemet ve sertliğe sahip olmalarıdır. Polimer matrisin daha düşük yoğunluğu, ürün mukavemetini önemli ölçüde azaltırken yüksek mukavemetli lifler yükü taşırlar. Elyaf takviyeli kompozitlerde, güçlendirici fiberin tipi, uzunluğu ve hizalaması değiştirilerek özelliklerde büyük değişiklikler elde edilebilir. Bu istenen özelliklere ulaşılması, belirli matris, fiber ve diğer parametrelerin uygun bir seçimi ile gerçekleşir. Takviye elyafının uzunluğuna bağlı olarak, FRP kompozitleri kısa FRP (SFRP) ve sürekli FRP kompozitleri olarak sınıflandırılmıştır. Sürekli lifler, yönlendirilmesi ve dağıtılması kolaydır, yüksek boyutsal stabilite, düşük büzülme ve yüksek darbe dayanımı gösterirler. Bununla birlikte, karmaşık şekillerin üretimi için, daha fazla ürün maliyeti gerektirir ve işlenmesi daha zor hale gelir. Öte yandan, kısa elyaf takviyeli polimer (SFRP) kompozitleri, nispeten kolay ve hızlı üretimleri, daha düşük üretim maliyeti ve karmaşık şekiller oluşturmak için uygunluğu nedeniyle önemli teknik avantajlar sunmaktadır. SFRP kompozitleri, uçak ve havacılık endüstrileri tarafından birincil yapılar olarak kullanılan sürekli fiber takviyeli kompozitler

ile yük taşınan uygulamalar haricinde kullanılan takviyesiz polimerler arasındaki mekanik özellik boşluğunu doldurur (Kar, 2017).

3.3.2. Parçacık takviyeli kompozitler

Parçacık takviyeli kompozitlere ilgi son yıllarda artmaktadır. Bu kompozitlerin başlıca avantajları, elyaf takviyeli kompozitlere kıyasla düşük hammadde maliyeti ve daha düşük işlem maliyetidir. Ayrıca, parçacık takviyeli kompozitler, parçacık boyutunun bileşen boyutuna kıyasla yeterince küçük olduğu durumlarda izotropik özelliklere sahip olabilirler (Poveda, 2016).

3.4. Polimer Matrisli Kompozitlerde Matris Malzemeleri

3.4.1. Termoset reçineler

Termoset reçineler, genellikle sıvı halde bulunan, geri dönüşümsüz olarak kürlenmiş polimer malzemelerdir. Kürlenme işlemi, ısı (örn. siyanat ester reçineleri), kimyasal reaksiyon (örn. epoksi reçineler) ve kızılötesi, ultraviyole ışık veya elektron ışını gibi ışınlama (örn. vinil ester reçineleri) ile gerçekleştirilebilir. Sertleştikten sonra, malzeme tekrar ısıtılamaz ve orijinal sıvı formuna geri eritilemez. Bazı termoset reçine çeşitleri aşağıda sıralanmıştır;

- Siyanat ester reçineleri
- Epoksi reçineler
- Fenolik reçineler
- Polyester reçineler
- Polyamid reçineler
- Vinil ester reçineler (Park, 2015).

Epoksi reçineler

Epoksi grupları içeren polimerler epoksi reçineler olarak adlandırılır. Bir epoksi grubu, iki veya daha fazla karbon atomu ve bir oksijen atomu tarafından oluşturulan bir periyodik gruptur. Epoksi reçineler, aşağıda gösterildiği gibi birden fazla epoksit grubu içeren moleküllerdir (Rana, 2016).

Epoksi reçineler, çok çeşitli sertleştirici maddeler ile birlikte ısıyla sertleşen polimerlerdir. Epoksi reçineler; fiber takviyeli malzemeler, genel amaçlı yapıştırıcılar ve yüksek performanslı kaplamalar da dahil olmak üzere geniş bir uygulama alanına sahiptir. Epoksi reçineler polyester reçinelerden daha iyi yapışma mukavemetine ve kimyasal dirence sahiptir, ancak daha pahalıdır. Polyester reçinelerin aksine, sertleştiriciler epoksi reçinelerin kürlenmesi için kullanılırlar. Sertleştiriciler, kürlenmeden sonra yapının bir parçası haline gelirler. Bundan dolayı, epoksi reçinelerin özellikleri ayrıca sertleştiricilerin yapısı tarafından kontrol edilir. Epoksi reçinesinin sertleştirilmesi iki aşamada gerçekleşir. İlk aşamada, doğrusal polimer zincirleri, epoksi gruplarının ve amin gruplarının reaksiyonu ile oluşturulur. Çapraz bağlantılar daha sonra kalan epoksi gruplarının ve ikincil amin gruplarının reaksiyonu ile oluşturulur (Jin, 2015; Park, 2015; Rana, 2016).

Çoğu epoksi, su ve ısıdan diğer polimer matrislere göre daha az etkilenecek şekilde hazırlanırlar. Ayrıca epoksi reçineler, kullanılan küreleştirici ve hızlandırıcıların türüne bağlı olarak 5 ila 150°C arasında herhangi bir sıcaklıktaki basit sertleştirme işlemlerine tabi tutulabilirler. Epoksi reçineler, birçok sektörde kendilerine kullanım alanı bulmuşlardır. Epoksiler, uçak yapıları için yapıştırıcı olarak, hava taşıtı ve füze uygulamaları için laminasyon reçineleri olarak kullanılırlar. Plastik ve metal botların, otomobillerin yapımı ve onarımı için gövde lehimleme bileşikleri olarak çok kullanışlıdır. Bina ve otoyol yapımında, dolgu macunu bileşikleri (yüksek kimyasal direnç gerektiğinde) olarak kullanılırlar. Ayrıca, elektriksel işlerde mükemmel elektrik yalıtımı nedeniyle geniş bir kullanım alanına sahiptirler (Barbero, 2017; Lee, 1967).

3.4.2. Termoplastik reçineler

Termoplastik reçineler, genellikle çapraz bağlı olmayan uzun polimer moleküllerinden oluşur. Reçine tekrar tekrar eritebilir ve yeniden kullanılabilir. Genellikle, termoplastik reçineler kürlendiğinde hiçbir kimyasal değişim meydana gelmez. Termoplastik reçineler çoğunlukla; enjeksiyon kalıplama, rotasyonel kalıplama, ekstrüzyon, vakum kalıplama ve sıkıştırma kalıplama gibi geleneksel kalıplama yöntemlerini kullanarak imalat yapmaya izin veren bir yapıya sahiptir. Termoplastik reçineler yüksek darbe dayanımına ve geri dönüştürülebilirliğe sahiptir. Diğer termoplastiklere bağlanabilirler ve yeniden ısıtılarak kalıplanmaya veya şekillendirilmeye müsaade ederler. Bazı termoplastik reçine çeşitleri aşağıda sıralanmıştır;

- Akrilonitril bütadien stiren reçineler
- Polyamid reçineler
- Polikarbonat reçineler
- Polietereterketon reçineler
- Polieterimid reçineler
- Polietersülfon reçineler
- Polietilen reçineler
- Polifenilen sülfür reçineler
- Polipropilen reçineler (Park, 2015).

3.5. Polimer Matrisli Kompozitlerde Takviye Malzemeleri

Matris malzemesi içerisinde yer alan elyaf takviyeler kompozit yapının temel mukavemet elemanlarıdır. Düşük yoğunluklarının yanı sıra yüksek elastik modül ve sertliğe sahip olan elyaflar kimyasal korozyona da dirençlidirler. Günümüzde kompozitlerin yapısında boyutsal ve şekilsel özellikleri çok farklı lifler veya elyaflar kullanılmaktadır. Liflerin çoğulu olan “elyaf”, birçok lifin bir araya gelmesiyle oluşmaktadır. Liflerin çapı ortalama 0,01mm mertebesinde dir. Lifler birçok değişik kaynaktan elde edilebilmekte ve özellikleri bakımından büyük çeşitlilik göstermektedirler. Polimer matrisli kompozitlerde kullanılan başlıca fiber takviye malzemeleri; cam fiberler, karbon fiberler, SiC fiberler, alumina fiberler, bor fiberler ve grafit fiberlerdir (BilgiUstam, 2018).

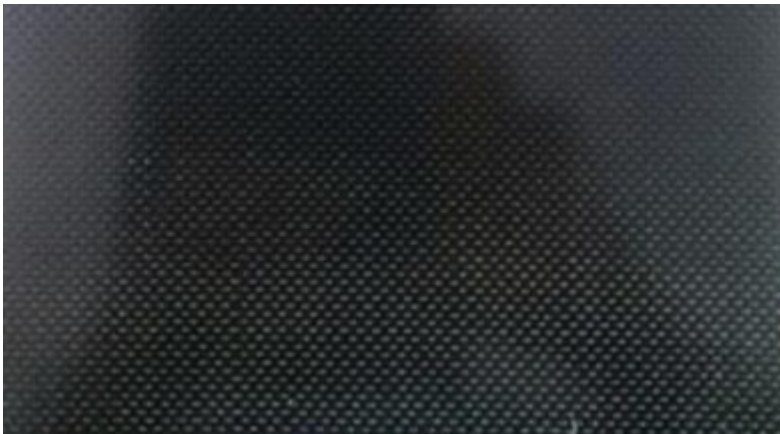
Pek çok güçlendirici elyafın mekanik özellikleri, takviyesiz reçine sistemlerinden önemli ölçüde daha yüksektir. Bu nedenle, kompozit malzemelerin mekanik özellikleri, liflerin kompozite katıldığı miktar ile belirlenir. Liflerin katkısının kompozit malzemeye etkisini yöneten dört ana faktör bulunmaktadır. Bunlar;

- Elyafın temel mekanik özellikleri
- Lif ve reçinenin ara yüzey etkileşimi
- Kompozit içindeki lif miktarı
- Elyaftaki liflerin oryantasyonu (SP Systems, 2017).

3.5.1. Karbon fiber

Genel olarak karbon fiberler, ağırlıkça %92-100 arası karbon içeren lifler olarak geniş bir şekilde tanımlanmaktadır. Karbon fiber olarak adlandırılan ve 2000°C'nin üzerinde ısıyla işlenen lifler ile grafit lifler olarak adlandırılan 1000-1500°C arasında ısı işlem görmüş lifler arasında bir ayrım bulunmaktadır. Karbon fiberdeki grafit oranı %0 ile 100 arasında değişebilir. Oran %99'un üzerinde olduğunda ise liflere grafit elyaf denilir (Park, 2015).

Karbon fiberler, son derece yüksek bir Young modülü ile birlikte düşük bir yoğunluk (2270 kg.m^{-3}) sergilerler. Poliakrilonitril (PAN) karbon fiberleri, başlıca karbon monofilamanlarını temsil ederler. Bu lifler, poliakrilonitril veya akrilik kopolimerleri olarak adlandırılan öncü fiberlerin pirolizinden elde edilir. Elyaflaştırma adı verilen ilk aşama, bir çözücü içindeki polimerin bir çözeltisinin, nihai olarak karbon fiberlere dönüştürüldüğü PAN öncü fiberlerine ıslak veya kuru şekilde dönüştürülmesinden oluşur. Her bir çekme aşaması için daha az filament, daha yüksek bir saflık, daha küçük bir filaman çapı ve daha yüksek bir akrilonitril içeriği sergilerler. Daha sonra, stabilizasyon sırasında fiber, bir saat boyunca 200 ila 300°C arasında değişen sıcaklıklarda bir fırında ısıtılır. Stabilizasyon işleminin ardından, yabancı elementlerin uzaklaştırılması için inert bir atmosferde 1200°C'den daha yüksek sıcaklıklarda karbonizasyon sağlanır. Karbon fiber daha sonra yüzey işlemine tabi tutulur. Yüzey işlemi, kompozit içindeki fiberin matris reçinesine yapışmasını desteklemek için fiber yüzeyinin bir oksidasyonudur ve fiberin matris reçinesi ile ıslanabilirliği boyut ile artırılır. Resim 3.2'de dokuma karbon fiber örneği gösterilmektedir (Cardarelli, 2008).



Resim 3.2. Dokuma karbon fiber kumaş (Sapuan, 2017)

Karbon fiberlerin sahip olduğu bazı başlıca özellikler bulunmaktadır. Bunlar:

- Yüksek spesifik modüle ve spesifik güce sahiptirler.
- Yüksek sıcaklıklarda yüksek çekme mukavemetlerini korurlar, ancak yüksek sıcaklıkta oksidasyona uğramaları bir sorun teşkil eder.
- Oda sıcaklığında karbon lifleri nemden veya çeşitli çözücülerden, asitlerden ve bazlardan etkilenmez.
- Bu lifler, kompozitlerin kendine özgü mühendislik özelliklerine sahip olmasını sağlayan çeşitli fiziksel ve mekanik özellikler sergilerler (Callister, 2014).

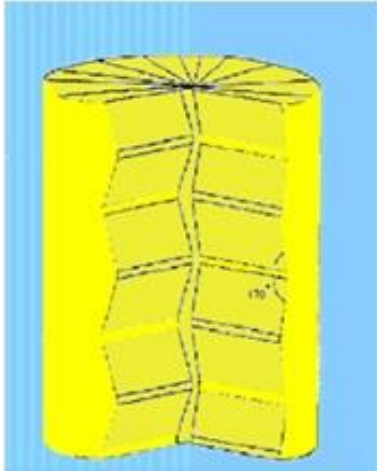
Karbon fiberler sahip oldukları bu özelliklerin haricinde zorlu ve çok aşamalı üretim süreçlerine sahiptirler. Bu nedenle, Toray, Toho Tenax, Mitsubishi Chemical, Hexcel ve Zoltek firmaları da dahil olmak üzere sadece sekiz büyük şirket karbon elyaflarının seri üretiminde başarılı olmuştur. Üretim süreçlerinin zorluğuna rağmen karbon fiberlerin kullanımında yıllar içinde sürekli artış gerçekleşmiştir. Karbon fiber uygulamalarının pazardaki kullanım ve yıllık büyüme oranı Şekil 3.3’de gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Karbon fiber uygulamalarının pazardaki kullanım ve yıllık büyüme oranı (Park, 2015)

3.5.2. Aramid fiber

Tam olarak hizalanmış, yüksek performanslı polimer fiberler yüksek gerilme mukavemeti sergilemektedir. Kompozit endüstrisi için ticarileştirilen ilk hizalı polimerik elyaf türü aramidlerdir. Bu lifler, uzun zincirli poliamidlerden özel ıslak sarma teknikleri kullanılarak üretilirler. Güncel ticari üretimdeki en iyi bilinen aramid elyaf, 1970'lerin başlarında Du Pont firması tarafından kompozit malzeme pazarına sokulan Kevlar'dır. Aramid lifler, ekstrüzyon ve sarma teknikleri ile üretilirler ve bu, sert polimer moleküllerinin fiber eksenine paralel olarak düzgün hizalanmasını sağlar. Ayrıca, bunların morfolojisi, birbirine bağlanmış hidrojen molekülleri ile sert düzlemsel tabakalar içerir. Levhalar aksenal olarak katlı lamellar sistem formunda kristalli bir dizi üretmek için istiflenirler. Aramid liflerinin katlı yapısı Şekil 3.4'de gösterilmiştir. Katların her bir bileşeni yaklaşık 500 nm uzunluğundadır ve bitişik bileşenler arasındaki açı yaklaşık 170° 'dir (Dimitriou, 2010).



Şekil 3.4. Aramid liflerinin radyal olarak düzenlenmiş katlı yapısı (Dimitriou, 2010)

Aramid lifleri, sertlik, yüksek mukavemet, yüksek tokluk ve termal dayanımın kombinasyonunu sunarlar. Düşük yoğunluk ile birlikte bu özellikler onları; uzay aracı, uçak, otomobil, askeri ve spor ürünleri üretiminde kullanılan yüksek performanslı kompozitler için tercih edilen takviye elemanları yapmaktadır. Bunun haricinde, kullanımlarını kısıtlayan başlıca dezavantajları ise, çeşitli yüzeylere kimyasal ve mekanik bağlanmayı engelleyen düzgün yüzeyleri nedeniyle çoğu polimerik matris ile zayıf yapışma özelliği göstermeleridir. Bununla birlikte, kompozitlerin darbe performansı için zayıf lif-reçine etkileşimleri ve yüksek kayma sürtünmeleri, enerji emme kapasitelerini arttırmak için arzu edilen özelliklerdir (Kalantar, 1990; Dimitriou, 2010).

3.6. Polimer Matrisli Kompozitlerin Üretimi

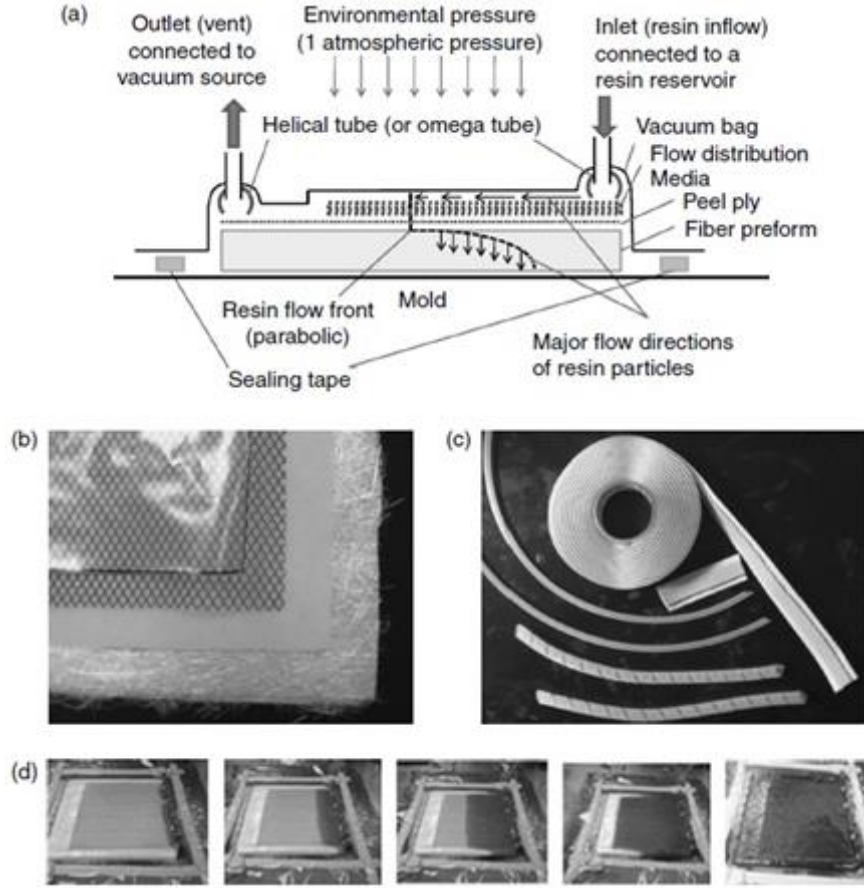
Polimer matrisli kompozitleri üretmek için günümüze kadar gelişerek gelen birçok farklı üretim süreci vardır. Bu süreçler; yeni fiber veya matris sistemleri geliştirmek, kompozit parça üretimindeki geometrik kısıtlamaları gidermek, maliyet etkin üretim yapmak, üretilen parçanın çoklu işlevselliğini sağlamak ve özel, fiziksel veya elektriksel özelliklerini iyileştirmek gibi çeşitli ihtiyaçları karşılamak için modifiye edilmiş veya geliştirilmiştir. Kompozit sanayisinde; daha yüksek kalitede ve düşük maliyetle kompozit parçaların üretimi, yeni takviye sistemleri ve yeni polimer matris sistemleri gibi yeni üretim süreçlerinin gelişimi devam etmektedir. Analitik modelleme ve sayısal simülasyonlar ile birlikte bilimsel yaklaşımlar, prototip üretimine ve testine yatırım yapmadan önce üretim esnasında gerçekleşecek süreçleri tahmin etmek amacıyla günümüzde daha etkin bir şekilde kullanılmaktadır. Kompozit ürünlerin yapısal tasarımının, imalat ve montaj proseslerinin en etkin şekilde kullanılması, daha düşük maliyetlerle yeni malzemelerin geliştirilmesinin yanında kompozit sanayisini geliştirmeye devam ederek, çeşitli endüstrilerdeki büyümenin hızlandırılması açısından gelecekte bir potansiyel teşkil edecektir. Polimer matrisli kompozitlerin bazı üretim yöntemleri aşağıdadır;

- Enjeksiyon kalıplama
- Sıkıştırma kalıplaması
- Reçine transfer kalıplama (RTM)
- Vakum destekli reçine transfer kalıplama (VARTM)
- Sıkıştırma reçine transfer kalıplama (CRTM)
- Polimer matris kompozitlerinde pultrüzyon işlemi
- Kompozitler için otoklavla üretim
- Polimer matris kompozitlerin otoklav dışı kürleşme süreci (Advani, 2012).

3.6.1. Vakum destekli reçine transfer kalıplama (VARTM)

VARTM yöntemi, daha yüksek kalite ve daha düşük maliyetle, karmaşık kompozit parçalar üretmek için geliştirilmiştir. Özellikle son yirmi yıl boyunca ciddi gelişim gösteren vakum destekli reçine transfer kalıplama (VARTM) işlemi, fiber takviyeli polimer (FRP) kompozit laminatların üretimi için yaygın olarak kullanılan bir işlemdir. Azaltılmış uçucu organik bileşik yayılımına sahip kapalı kalıp prosesi olan VARTM; yüksek kalite, tekrarlanabilirlik ve reçine transfer kalıplama işleminin faydalarını açık kalıp el yatırması işleminin esneklik ve ölçeklenebilirlik avantajlarıyla birleştirir. VARTM; deniz, enerji, altyapı, havacılık ve savunma endüstrilerinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Advani, 2012).

VARTM işlemi için atmosfer basıncı, vakum torbası ile kalıp arasında kapatılan ve sıkıştırılan fiber ön kalıp düzeneğine (yani, fiber malzeme/soyma kumaşı/infüzyon filesi/sarmal borular) ters sıkıştırma basıncını sağlamak için kullanılır. El yatırması işleminin açık kalıbına özdeş olan VARTM kalıbı, bir RTM kalıbından çok daha büyük boyutlarda yapılabilir. VARTM işlemi RTM işleminden farklı olarak, ön kalıbı sıkıştırmak için vakum basıncı ve çevre basıncı arasındaki basınç farkını kullanır. Vakum sayesinde ön kalıbı kullanılan kalıba sabitler ve reçineyi ön kalıbın içine çeker. VARTM işleminin şematik gösterimi, kullanılan malzemeler ve işlemin ilerleyişi Şekil 3.5’de gösterilmiştir (Advani, 2012).



Şekil 3.5. Tipik bir VARTM prosesi: (a) VARTM işleminin şematik gösterimi, (b) Cam elyaf kumaş, soyma kumaşı, infüzyon filesi ve vakum torbası (alttan üste doğru), (c) Sızdırmazlık bantı, reçine boruları ve sarmal borular (yukarıdan aşağıya doğru), (d) Reçine infüzyonu sırasında kaydedilen fotoğraflar (soldan sağa) (Advani, 2012)

VARTM sürecinin başlıca avantaj ve dezavantajları aşağıdadır;

Avantajlar:

- Esnek kalıp tasarımına ve kalıp malzemelerinin seçimine olanak tanır.
- Yüksek kalitede büyük ve karmaşık kompozit parçalar üretilebilir.
- VARTM kalıbı, farklı parça geometrileri üretmek için kolaylıkla modifiye edilebilir.
- Reçine ve katalizör ayrı ayrı saklanabilir ve infüzyondan hemen önce karıştırılabilir.
- Şeffaf plastik vakum torbası sayesinde reçine infüzyon işlemi sırasında ortaya çıkan görünür bir kuru noktaya anında müdahale edilebilir.

Dezavantajlar:

- Vakum torbası, akış dağıtım filesi, soyma kumaşı, sızdırmazlık bandı ve reçine boruları tekrar kullanılamaz. Bu sarf malzemelerinin her bir VARTM işlemi için yeniden hazırlanmaları gerekir.
- Hava sızıntısı olasılığı yüksektir ve bu durum; çalışanların yeteneklerine, tecrübelerine, sarf malzemelerinin kalitesine bağlıdır. Hava sızıntısı, hatalı üretime neden olabilir. Üretim süreci boyunca, herhangi bir zamanda bir sızıntı başlayabileceği ve kompozit parça zarar görebileceği için dikkatli ve sık yapılan bir muayene gereklidir.
- VARTM işleminde reçinenin vakumlanma basıncı, tipik bir RTM işlemi sırasında uygulanan basınçtan çok daha azdır ve hava boşluğunun sıkıştırılabilirliği sınırlıdır.
- Elyaf üzerindeki kısmen düşük olan basınç, kompozit parçanın elyaf hacmi oranını sınırlayabilir (Advani, 2012).

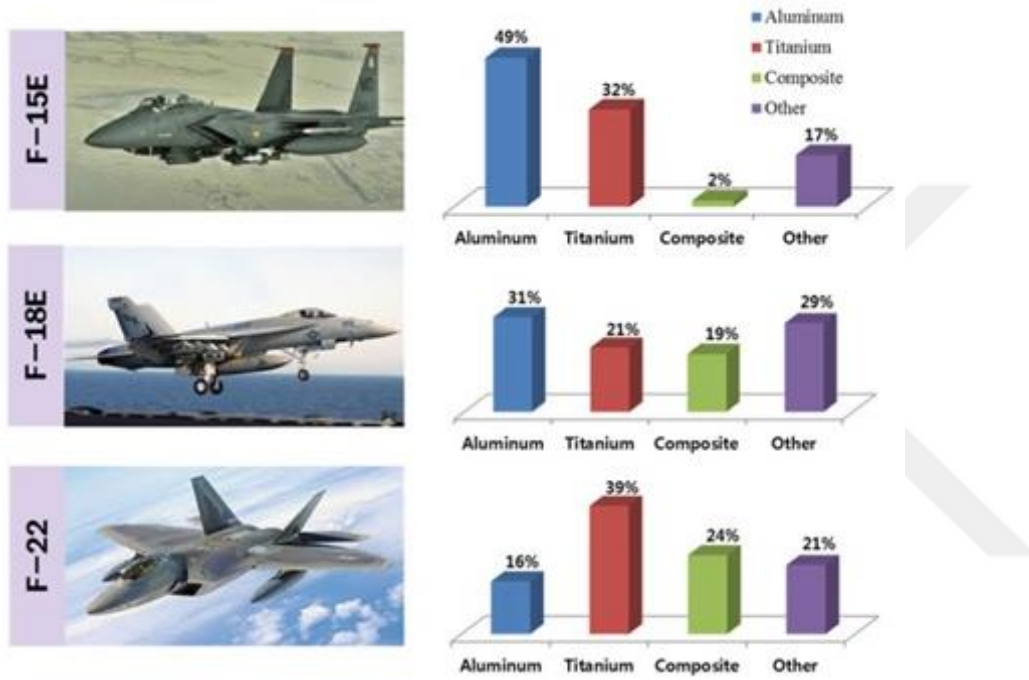
3.7. Kompozit Malzemelerin Kullanım Alanları

Fiber takviyeli kompozitlerin kullanımı; artan mukavemet, dayanıklılık, korozyon direnci, yorulma ve hasar tolerans özelliklerine bağlı olarak birçok yapı bileşeni için geleneksel metallere göre giderek daha cazip bir alternatif haline gelmiştir. Uygulamalarda kullanılan fiber takviyeli kompozitler, genellikle bir reçine matrisine gömülmüş lifler veya filamanlardan oluşmaktadır. En yaygın şekilde kullanılan lifler karbon ve türevleridir. Matris malzemesi olarak kullanılan reçinelerin farklı kürleme sıcaklıklarına sahip seçenekleri bulunmakla beraber, genellikle kullanılanlar 120-175°C arasında kürleme sıcaklıkları gerektiren epoksi bazlı sistemlerdir. Ayrıca elyaf takviyeli kompozitler metallere göre kullanımda daha fazla esneklik sağlarlar ve aynı zamanda önemli ağırlık avantajları sunarlar. Günümüzde kompozit parçalar, geleneksel metal muadillerinden yaklaşık % 20-30 daha hafiftir. Sağladıkları bunca avantajdan dolayı kompozitler artık her sektörde kendilerine kullanım alanı bulmuşlardır (Mallick, 2007; Park, 2015).

Havacılık endüstrisi

Fiber takviyeli kompozitlerin uçaklara uygulanması yaklaşık 30 yıl öncesine dayanmaktadır. Kompozit malzemelerin uçak yapılarına ilk uygulamaları; kaplamalar, küçük kapılar ve kontrol yüzeyleri gibi ikincil yapıları içeriyordu. Daha sonraki süreçte teknolojinin ilerlemesiyle birlikte, yüksek performanslarından dolayı askeri ve sivil

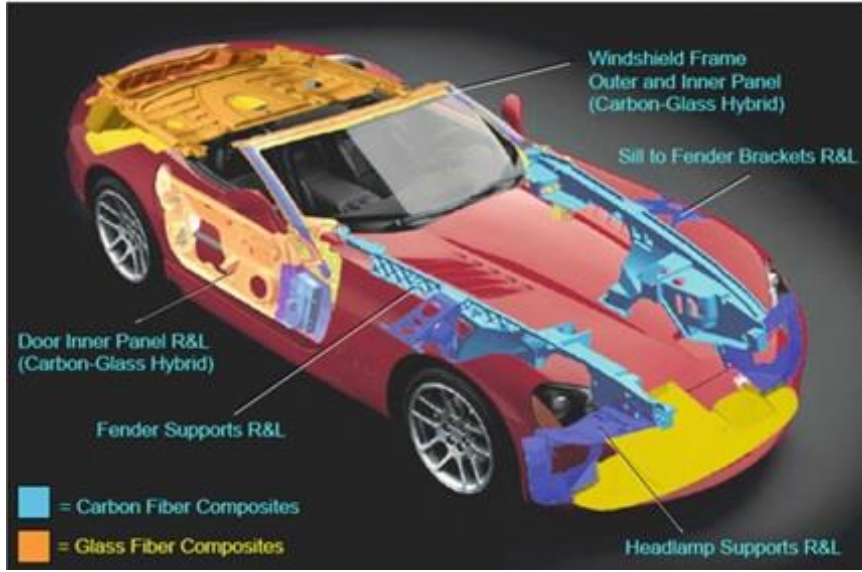
uçaklarda kanatlar ve sigortalar gibi birincil yapılar için kompozitlerin kullanımında artış olmuştur. Savaş uçaklarının yapısında kompozit malzeme kullanımının uçak modellerine göre değişimi Şekil 3.6'da gösterilmiştir. Uçak endüstrisinde, kompozitler kullanımı yalnızca ağırlık azaltılması için değil, aynı zamanda korozyon ve yorulmaya karşı dirençli oldukları için tercih edilmektedir. Bu malzemelerin uygulamalarındaki sınırlayıcı faktör, geleneksel metallere kıyasla yüksek maliyetli olmalarıdır (Park, 2015; Kapidzic, 2014).



Şekil 3.6. Savaş uçaklarında fiber takviyeli kompozitlerin kullanım oranlarının değişimi (Park, 2015)

Otomotiv endüstrisi

Günümüz dünyasında otomotiv şirketleri, yaşanan yoğun rekabetten dolayı üretimlerinde yeni yollar ve yenilikler aramak zorunda kalmaktalar. Otomobillerin, düşük maliyetle birlikte müşterilerin talep ettiği tüm özelliklere sahip olması istenmektedir. Bu durum, kompozit malzemelerin; gövde, iç mekan, şasi, davlumbaz ve elektrikli bileşenler gibi parçaların yapımında kullanılmasına yol açmıştır. Bu nedenle, kompozitler günümüzde otomotiv endüstrisi için daha önemlidir ve gelecekte de daha geniş otomobil yelpazesinde kullanımları yaygınlaşabilir. Ayrıca, bu tür bileşenlerin kullanımlarındaki artış üretim maliyetlerini de düşürecektir. Şekil 3.7'de yüksek performanslı bir araçta kullanılan çeşitli kompozit parçalar görülmektedir (Park, 2015; Park, 2011; Poveda, 2016).



Şekil 3.7. Otomobillerde karbon fiber takviyeli kompozit kullanımı (Park, 2015)

Denizcilik endüstrisi

Son zamanlarda kompozitler, deniz ortamına karşı yüksek direnç göstermeleri nedeniyle denizcilik sektöründe yaygın olarak kullanılmaktadır. Gemilerde, hem gemi hem de yolcu güvenliği için gelişmiş hibrit kompozitler kullanılmaktadır. Kompozit malzemelerin kullanıldığı başlıca yapısal elemanlar, pencere kapakları, direkler ve pruva kısımlarıdır. Denizcilik sektöründeki kompozit uygulamaları, yüksek hızlı teknelerde, deniz taşıtlarında, yelkenli teknelerde, balıkçı teknelerinde, yüksek kapasiteli trollerde, mavnalarda ve diğer gemi bileşenlerindeki kullanımı son on yılda hız kazanmıştır. Gemilerde kullanılan gelişmiş kompozit malzemeler, imalat ve bakım maliyetlerini düşürme, karmaşık şekilli yapıların uygulanmasını kolaylaştırma, ağırlığı azaltma ve güvenilirliği artırma potansiyeline sahiptir. Resim 3.3’de bir teknenin kompozit malzeme kullanılarak yapılan üretimi görülmektedir (Kimpapa, 1991; Park, 2015).



Resim 3.3. Tekne gövdesinin el yatırması yöntemiyle üretimi (Krishnaraj, 2013)

Rüzgar türbin kanatları

Direk için kullanılan geleneksel materyaller, polimer reçine matrisi ve E-cam, karbon fiber vb. takviye lifleridir. Havadaki rüzgarı olabildiğince etkin bir şekilde kullanabilmek için özel tasarlanmış kanatlara sahip bu makinelerde kullanılan kompozit malzemeler, kanatlar için uygun maliyetli malzemelerdir ve yapılarda gerekli mukavemet ve sertliği sağlarlar. Rüzgar türbin kanatları, kullanım ömürleri boyunca sağlamlıklarını korumalı ve güvenliklerinden ödün vermeden çalışabilmelidirler. Bu tür gereksinimler, tercih edilen malzemelerin ileri kompozitler olmasına neden olmaktadır (Park, 2015).

3.8. Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzemeler

Yüksek mukavemet/ağırlık ve sertlik/ağırlık oranlarına sahip en hafif kompozit malzemeler, uçak endüstrisinde ve diğer mühendislik uygulamalarında başarılı bir şekilde kullanılmıştır. Bununla birlikte, geleneksel kompozit malzemeler, yüksek sıcaklıktaki ortamlarda çalıştırılmaz. Genel olarak, metaller uzun yıllardır yüksek mukavemet ve dayanıklılıklarından dolayı mühendislik alanında kullanılmalarına rağmen, yüksek sıcaklıkta metalin mukavemeti geleneksel kompozit malzemeye benzer şekilde azalır. Buna karşın, seramik malzemeler ısı direncinde mükemmel özelliklere sahiptir. Mühendislikte yaşanan gelişmeler, fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler (FDM) adı verilen yeni bir malzeme sınıfının ortaya çıkmasına yol açmıştır. Bunlar ikinci nesil

kompozit malzemeleri temsil eder ve üstün performans seviyeleri elde etmek için tasarlanmıştır (Shen, 2009; Ebrahimi, 2016).

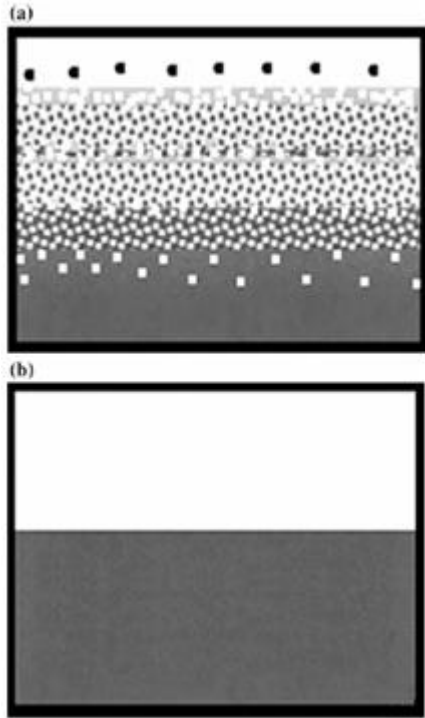
Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler, zorlu çalışma ortamlarında, özelliklerini kaybetmeden ve bozulmadan çalışabilen gelişmiş mühendislik materyalleridir. Bu malzemeler, değişen işlevsellikleri karşılamak için tasarlanmış malzemelerdir. Mühendislik, problemlerini çözmeye ve bir takım sorulara cevap aramaya çalışırken birçok durumda doğaya yönelmektedir. FDM bu gibi durumlardan bir tanesidir. Doğada bu malzemeler gerekli olan kullanım koşullarına göre şekillenmişlerdir. Örneğin, bir insan dişinin dış kısmında gerekli olan aşınmaya dayanıklılık ve içyapısında gerekli olan süneklik, doğanın dişleri fonksiyonel derecelendirilmiş bir materyal olarak tasarlamasına sebebiyet vermiştir. Bunun haricinde FDM'lere örnek olarak, kemik, diş, ağaç ve bambu gibi doğada bulunan materyaller verilebilir (Mahamood, 2017; Niino, 1987; Knoppers, 2003).

Mühendislik uygulamaları için fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme fikri ilk olarak 1980'lerin başında, Japonya'daki araştırmacıların, uzay aracında çok yüksek bir sıcaklık farkına dayanabilecek bir kompozit malzeme türünü gerektiren bir sorunla karşı karşıya kaldıkları zaman ortaya çıkmıştır. Uygulama, kompozit malzemelerin bir tarafının yaklaşık 2000 K'lık bir sıcaklığa tabi tutulmasını ve bu sıcaklığın, kompozit malzemenin diğer kısmına iletilmemesini gerektirdi. Yani, aracın gövdesinin iç ve dış kısmı arasında yaklaşık 1000 K'lık bir sıcaklık farkına maruz kalacak bir kompozit malzemeye ihtiyaç duyulmuştur (Mahamood, 2017; Niino, 1987).

Geleneksel kompozit malzemeler bu tür aşırı yüksek sıcaklıktaki çalışma koşullarına dayanmakta. Geleneksel kompozit malzemelerin başarısızlık noktalarının genellikle benzer olduğu bulundu. Bu başarısızlık, genellikle iki malzemenin bir araya getirildiği noktada oluşmaktadır. Ara yüzdeki süreksizlik, ara yüzde mevcut olan yüksek stres konsantrasyonundan kaynaklanmaktadır. Kompozit malzemeye termal yük uygulandığında meydana gelen termal uyumsuzluk, iki malzemenin farklı genleşme özelliklerinden dolayı malzemelerin ayrılmasına neden olmuştur. Kompozit materyali oluşturan iki malzeme arasındaki keskin ara yüz ortadan kaldırıldığı takdirde sorun çözülecekti. İki malzemenin ayrı ayrı birleştirilmesiyle elde edilen keskin ara yüze karşı, ikinci malzemeyi yavaş yavaş

birinci malzemeye sokarak birleşik bir ara yüzey yapıldı. Bu şekilde geliştirilen kompozit malzeme, istenen yüksek sıcaklık uygulamasına dayanabilmiştir (Mahamood, 2017).

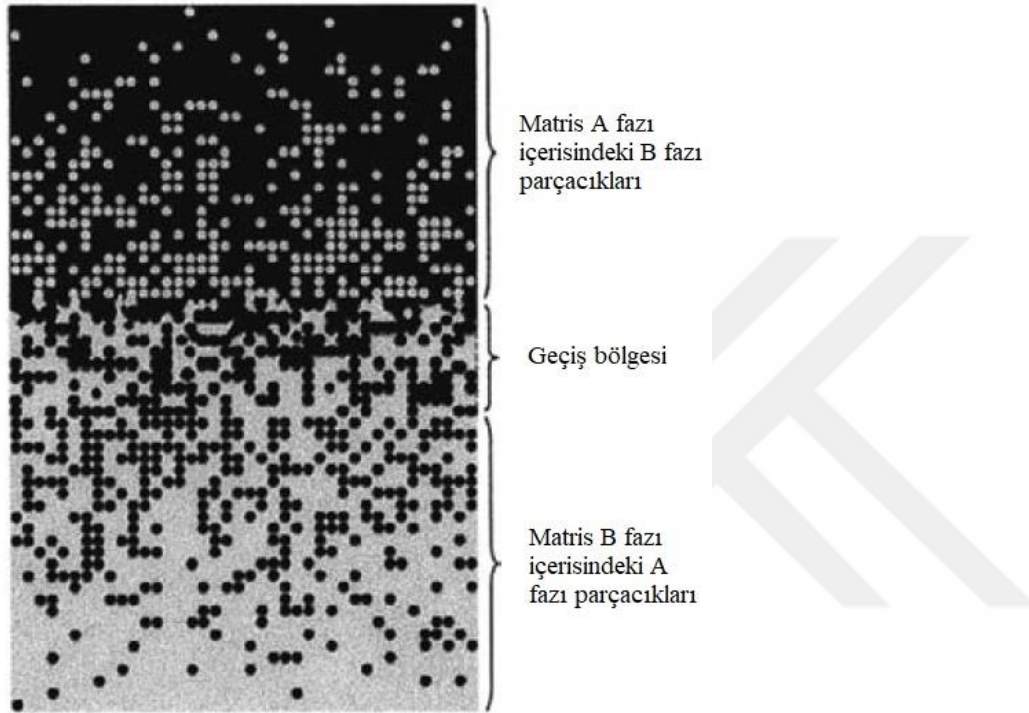
Dönüşüm ara yüzü ile geliştirilen bu kompozit malzeme fonksiyonel olarak derecelendirilmiş malzeme olarak adlandırılır. FDM'ler iki farklı malzeme arasında keskin bir ara yüzden ziyade dereceli bir ara yüzeye sahiptir. Eğer ara yüz yeterince pürüzsüz ve geçiş düzgün ise, kimyasal bileşiminde belirgin bir değişiklik meydana gelemez ve maddedeki bir noktadan diğerine olan uyumsuzluklar sınırlı olur. Bu nedenle, kompozitin bir bölgesinden diğer bir bölgesine göre zayıf olan bir yer olmayacaktır. Geleneksel lamine kompozit malzemenin ve fonksiyonel derecelendirilmiş malzemenin şematik gösterimi Şekil 3.8'de verilmiştir (Ebrahimi, 2016).



Şekil 3.8. (a) fonksiyonel derecelendirilmiş malzemenin (b) geleneksel laminat kompozit malzemenin şematik gösterimi (Mahamood, 2017)

Geçmişte, FDM'lerin bileşimi tipik olarak en az bir metal fazı içermekteydi. Son zamanlarda, sahip oldukları yüksek özelliklerinden dolayı seramik-seramik ve cam-seramik sistemlerine büyük önem verilmiştir. Farklı malzeme bileşenlerine sahip tipik bir FDM, genellikle seramik ve metal parçacıklardan yapılmış homojen olmayan bir kompozittir. Şekil 3.9'daki bu tür malzemelere bir örnek, parçacıkların bir matris içine gömüldüğünü göstermektedir. FDM'ler içinde farklı mikroyapısal fazlar farklı işlevlere sahiptir. Yapılarındaki malzemelerin hacim oranının kademeli olarak değiştirilmesiyle,

malzeme özellikleri bir yüzeyden diğerine düzgün ve sürekli bir değişim sergiler. Böylece ara yüz problemlerini ortadan kaldırılır ve termal stres konsantrasyonları hafifletilir. FDM'lerin seramik bileşenlerinin iyi termal direnç özelliklerine bağlı olarak yüksek sıcaklıklı ortamlara dayanabilmeleri ve metal/seramik bileşenlerinin güçlü mekanik performans sağlamaları, kırılma dayanımlarını artırmaktadır (Ebrahimi, 2016; Shen, 2009).



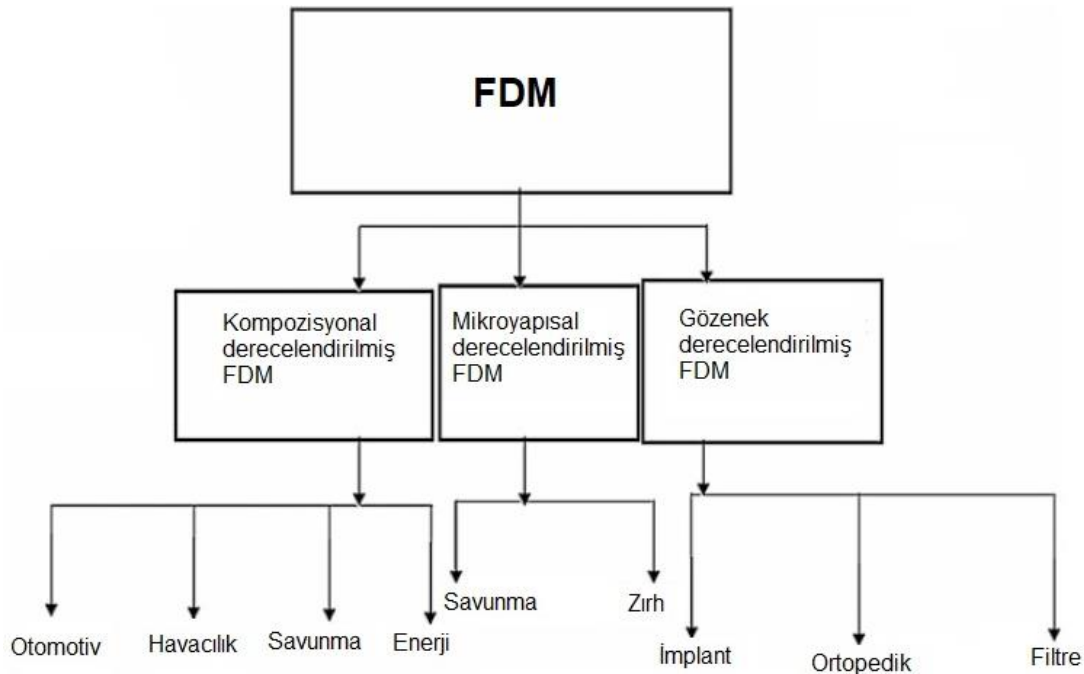
Şekil 3.9. A ve B fazlarının ve geçiş bölgesinin gösterildiği iki fazlı FDM örneği (Paulino, 2006)

FDM başlangıçta termal bariyer uygulaması için geliştirildi ancak bugün, balistik zırh uygulamaları ve yangın geciktirici uygulamalar gibi insan faktörünün bulunduğu birçok alanda kendine yer bulmuştur. Mevcut uygulama alanları arasında havacılık, otomobil, biyomedikal, savunma, elektrik/elektronik, enerji, denizcilik, opto-elektronik ve termoelektronik vardır. FDM kullanımı, şu anda endüstrilerde sürdürülebilir gelişmeyi desteklemek için en önemli, etkili ve verimli malzemelerden biri olarak görülmektedir (Mahamood, 2017).

3.8.1. Fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme türleri

Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelere artan ilgi, farklı tipte FDM'lerin geliştirilmesine neden olmuştur. Genellikle amaçlanan uygulamanın tipi kullanılacak FDM

tipini belirler. Örneğin, biyomedikal uygulamada, bazı implantların, değiştirmeyi veya onarmayı planlandıkları insan organını taklit etmeleri gerekir. Çünkü çevre dokuları tahrip etmeden düzgün bir şekilde çalışabilmeleri ve uzun süre hizmet edebilmeleri gerekir. İnsan vücudunun çoğu noktasının işlevsellik gereksinimi nedeniyle FDM'lerden oluştuğu görülmüştür. Bu, değiştirilmekte olan ya da onarılmakta olan parça ile eşleşmesi için implantların FDM'den yapılmasının nedenlerinden biridir. Farklı türde FDM'ler bulunmaktadır. Bunlar; kimyasal derecelendirilmiş FDM, mikrokimyasal derecelendirilmiş FDM ve gözenek derecelendirilmiş FDM'dir. Şekil 3.10'da farklı FGM türleri ve uygulama alanları gösterilmektedir (Mahamood, 2017).



Şekil 3.10. Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemenin uygulama alanları (Mahamood, 2017)

FDM'nin çatlak yayılımını engelleyerek delinmeye karşı dirençli özellikler sunması, bu malzemelerin savunma endüstrisinde tercih edilmesine neden olmuştur. FDM, kurşungeçirmez yelekler, kurşungeçirmez araç gövdeleri, geleneksel Japon kılıçları ve zırh plakaları gibi uygulamalarda kullanılmaktadır (Mahamood, 2017).

3.8.2. Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerin üretim süreci

FDM'lerin üretiminin amacı; malzemenin mekanik, fiziksel ve kimyasal özelliklerini sürekli olarak değiştiren ve malzemenin içinde süreksizliğe sahip olmasına sebep olan

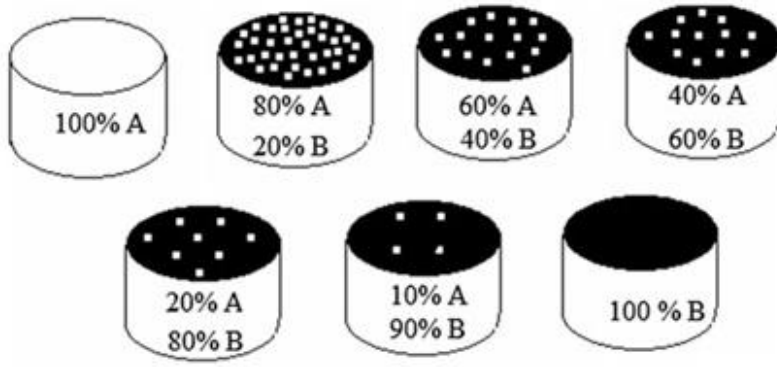
makroskopik sınırın ortadan kaldırılmasıdır. FDM üretimi, sonuçta nihai ürün elde etmek için birkaç proses kontrol adımı gerektiren karmaşık bir işlemdir (Ebrahimi, 2016).

Üretim süreci FDM araştırmasının en önemli alanlarından biridir. FDM'lere yapılan araştırmanın büyük bir kısmı işleme için ayrılmış ve FDM'lerin işlenmesinde kullanılmak üzere çok çeşitli üretim yöntemleri geliştirilmiştir. Bu mevcut üretim teknolojilerinden bazıları; toz metalurjisi, santrifüjlü döküm yöntemi ve bant döküm yöntemidir. Bu üretim yöntemlerinden hangisi en uygun olduğu esas olarak malzeme kombinasyonuna ve istenen bileşenin geometrisine bağlıdır. Ancak, toz metalurjisinin gelecekte FDM üretimi için en uygun yöntem olacağı bulunmuştur. Sinterleme prosesinin, üretilen FDM'lerin mikroyapısında ve mekanik özelliklerinde iyileştirmeler elde etmek için toz metalurji yönteminin uygulanmasındaki ana proses olduğuna inanılmaktadır (Ebrahimi, 2016; Mahamood, 2017; Jamaludin, 2013).

Toz metalurjisi

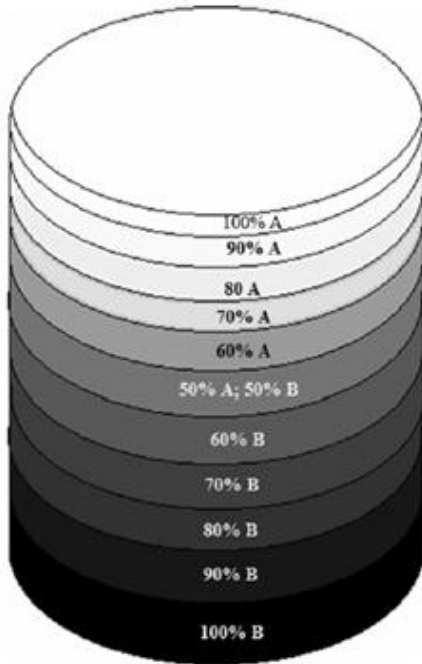
Toz metalurjisi, FDM üretmek için kullanılan eski bir üretim prosesidir. Geniş aralıkta kompozisyonun ve mikro yapının kontrolüne imkan vermesi ve çeşitli şekillerde parça oluşturulabilmesinden dolayı kullanılan en yaygın tekniklerden biridir. Toz metalürjisi yönteminin uygulanma aşamaları; toz malzemelerin hazırlanmasını, tozun istiflenmesini, şekillendirme işlemlerini ve sinterlemeyi içermektedir. Toz metalurjisi yöntemi ucuzdur ve kullanımı kolaydır. Bu sayede çok çeşitli malzemelerin işlenebilmesini mümkün kılar. Kontrol edilebilir özellikleri ile seri üretime izin verir. Uygun maliyetli bir teknik olmasının yanında, basit işleme ekipmanlarının kullanılabilmesi ve kısa işleme süreleri gibi bazı avantajlara sahiptir. Toz metalurjisi işleminin ana dezavantajları, parçaların mukavemetinin sınırlı olması ve karmaşık şekillerin bu işlemle üretilmemesidir (Mahamood, 2017; Ebrahimi, 2016).

Toz karışımları, FDM tasarımının gerekliliklerine dayanarak hazırlanır. A ve B şeklinde iki farklı tozun kullanımını gerektiren bir FDM tasarımı için, birinci toz karışımı olarak % 10 oranında A tozu uygun karıştırma işlemi kullanılarak % 90 oranında B tozu ile karıştırılır. İkinci toz karışımı, % 20 A tozu ve % 80 B tozu kullanılarak hazırlanır. Kullanılacak bütün toz karışım oranları bu şekilde hazırlanır, etiketlenir ve ayrılır. Bu işlemin şematik diyagramı Şekil 3.11'de gösterilmiştir (Mahamood, 2017).



Şekil 3.11. Toz karışımlarının hazırlanması (Mahamood, 2017)

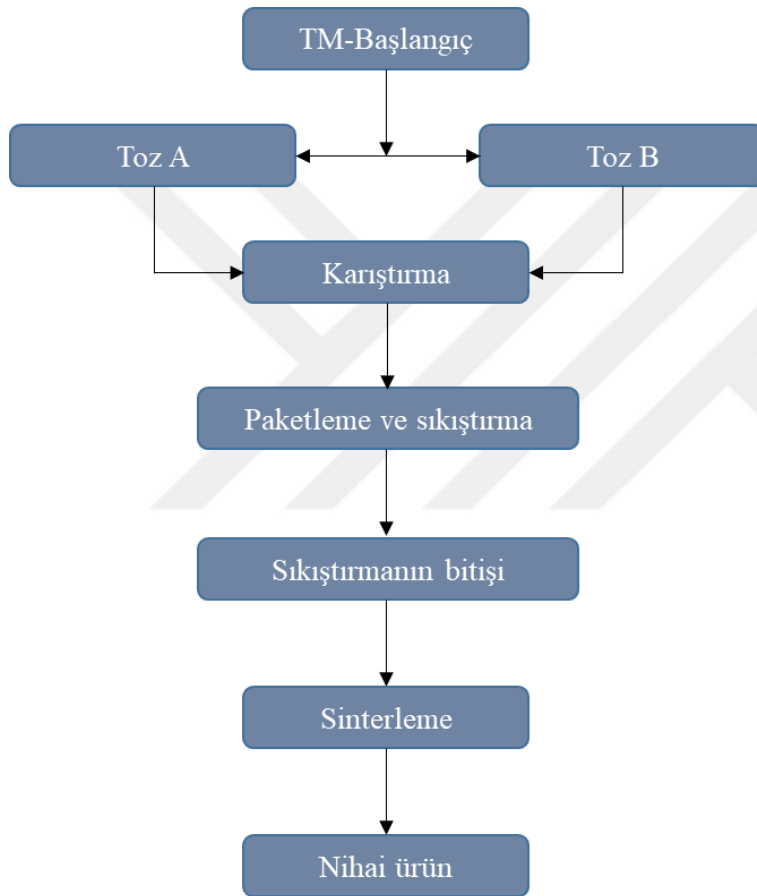
Çeşitli toz karışımları Şekil 3.11’de gösterildiği gibi hazırlandıktan sonraki adım tozları bir kalıp içinde toplamaktır. Toz karışımlarının her biri kalıba yerleştirildikten sonra, toz karışımı bir pres yardımıyla uygun basınç kullanılarak sıkıştırılır. Üst üste konulmuş ve sıkıştırma işlemi yapılmış toz karışımlarının şematik diyagramı Şekil 3.12’de gösterilmiştir (Mahamood, 2017).



Şekil 3.12. Üst üste konulmuş toz karışımı (Mahamood, 2017)

İstifleme ve sıkıştırma işlemlerinden sonra uygulanan aşama sinterlemedir. Tozun istifleme ve sıkıştırma işleminin tamamlanmasından sonra elde edilen blok malzeme, iki malzeme içerisinde düşük erime sıcaklığına sahip olan malzemenin erime sıcaklığının altındaki bir sıcaklıkta fırına yerleştirilir. Sıcaklık, tozun yüzey erimesini sağlayacak kadar yüksek

olmalıdır. Tozun yüzeyinin erimesi, tozların yüksek mukavemetle ve düzgün bir şekilde bağlanmasına neden olur. Sinterleme işlemi, üretilecek parçalarda daha yüksek yoğunluğa ihtiyaç duyulduğunda, sıcak presleme işlemi olarak bilinen basınç uygulaması ile eşzamanlı olarak gerçekleştirilebilir. Soğuk presleme işleminde ise, tozlar istifleme işlemi sırasında yeterince yüksek basınç kullanılarak sıkıştırılır ancak sinterleme işlemi basınç uygulanmadan gerçekleştirilir. Toz metalurjisi işleminin akış şeması Şekil 3.13’de gösterilmektedir (Mahamood, 2017).

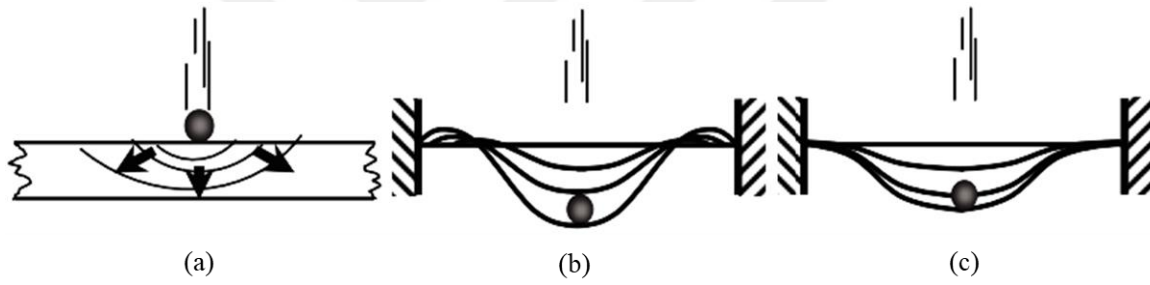


Şekil 3.13. FDM üretimi için toz metalurjisi akış şeması (Mahamood, 2017)

4. BALİSTİK

4.1. Hızlı Darbe Testi

Hızlı darbe testi, malzemelerin balistik özelliklerinin incelenmesi ve balistik test neticesinde elde edilecek sonuçlara ışık tutması bakımından bir ön balistik çalışması olarak da değerlendirilebilir. Kompozit malzemelerin darbe tepkisi düşük, orta ve yüksek olmak üzere üç farklı hızda incelenir. Yüksek hız balistik hız olarak da bilinir ve 50m/s ile 1000m/s hız aralığındaki darbeden kaynaklanan bir etki meydana getirmektedir. Darbenin 10m/s'nin altındaki hızlarda yapılması düşük hız olarak nitelendirilmektedir. 10m/s ile 50m/s aralığında gerçekleşen darbe hızları ise orta hızlı darbe testi olarak nitelendirilir. Şekil 4.1'de düşük, orta ve yüksek hızda gerçekleşen darbe tepkileri verilmiştir (Abrate, 2011; Potoğlu, 2012).



Şekil 4.1. Darbe tepkileri, (a) yüksek hızlı (balistik) darbe, çok kısa darbe sürelerinde gerçekleşen genişmeli dalganın yüksek olduğu tepki; (b) orta hızlı darbe, kısa darbe süreleri ile bükülgen ve keskin dalganın yüksek olduğu tepki; (c) düşük hızlı darbe, uzun darbe süreleri ile yarı statik meydana gelen tepki (Abrate, 2011; Potoğlu, 2012)

Düşük hızlı darbe, hedef sertliğine, malzeme özelliklerine ve çarpma tertibatının kütlesi ile sertliğine bağlı olarak üst sınırı 10 m/s olan bir işlem olarak ifade edilebilir. Polimer matrisli kompozit malzemeler, düşük hızlı darbenin sebebiyet verdiği iç hasarlara karşı hassastırlar. Birçok durumda yüzeyde hasar görülmez; ancak, iç hasar kompozit malzemenin hasar mukavemetini ve çalışma ömrünü azaltabilir. Kompozit malzemelerin darbe hasarları ile ilgili yapılan araştırmalar genel olarak hasar mekanizmalarına ve darbe sonrasındaki mekanik performanslarına odaklanmıştır. Düşük hız darbe etkisinde, hedefin dinamik yapı tepkisi önemlidir; çünkü temas süresi tüm yapının darbeye cevap vermesi için yeterince uzundur ve sonuçta elastik olarak daha fazla enerji emilir. Düşük hızlı darbe için hasar modu ve enerji emilimi; yükleme durumuna, numune büyüklüğüne, sertliğine ve

sınır koşullarına büyük ölçüde bağlıdır. Düşük hızlı darbe testine tabi tutulan numunelerin darbe enerjisi, genellikle matris kırılması, fiber kırılması ve ara yüzey ayrılmaları (delaminasyon) şeklinde absorbe edilir (Abrate, 2011; Potoğlu, 2012).

Fiber takviyeli plastik laminatların heterojen ve anizotropik yapısı, farklı hasar modları oluşturur. Pek çok durumda meydana gelen bu hasarlar; (1) gerilim ya da sıkıştırma veya kayma nedeniyle liflere paralel olarak meydana gelen matris çatlaması, (2) tabakalar arasındaki stresler sonucu katlar arasında ayrılma (delaminasyon), (3) fiber kırılması ve bükülmesi, (4) delinmedir. Hasar modları arasında meydana gelen etkileşim, hasar modunun başlatılmasını ve ilerlemesini etkiler. Bu modlar;

Matris hasarı

Matris hasarı, düşük hızlı darbe ile gerçekleşir ve genellikle fiber/matris bağının azalması veya ayrılması şeklinde gerçekleşir. Matris kırılmaları, tek yönlü fiberlere sahip kompozit malzemelerde fiber yönüne paralel gerçekleşir. Üst tabakalardaki matris çatlakları, vurucu ucun temas ettiği kenarlarda başlar. Çatlaklar, malzemeden geçen çok yüksek çapraz kayma gerilimi ile oluşur. Kayma gerilmeleri, temas kuvveti ve temas alanı ile bağlantılıdır.

Delaminasyon

Delaminasyon, katmanlar arasında gerçekleşen ayrılmadır. Delaminasyon, bitişik katmanlar arasındaki eğilme dayanımının uyumsuzluğunun bir sonucudur. Delaminasyon alanı genel olarak dikdörtgen şeklinde olup, ana eksenini ara yüzün altındaki katmanın fiber yönlenmesi ile çakışır. Uyumsuzluk ne kadar büyük olursa, delaminasyon alanı o kadar büyük olur. Bu aynı zamanda malzeme özelliklerinden, istifleme sırasından ve laminat kalınlığından da etkilenir.

Fiber kırılması

Fiber kırılması düşük hızlı darbe işleminde matris çatlaması ve delaminasyondan sonraki süreçte ortaya çıkar. Bölgesel olarak gerçekleşen yüksek baskılar ve eğilme etkileri

nedeniyle vurucu ucun hemen altında gerçekleşir. Fiber kırılması, ciddi bir hasar modu olan delinmenin öncü oluşumudur.

Delinme

Delinme, makroskopik bir hasar modudur. Fiber kırılması kritik bir boyuta ulaştığında gerçekleşir ve vurucu ucun malzemeye tamamen nüfuz etmesini sağlar. Delinme eşiği, numune kalınlığı ile birlikte artar. Laminat delinmesi esnasında temel enerji emme formları; kesme, delaminasyon ve elastik eğilmedir. Bu mekanizmalar arasındaki kesme mekanizması, levha kalınlığına bağlı olarak etkinin %50-60'ını oluşturur. Numune ebadı, fiber ebadı, fiberlerin dizilimi, dokuma mimarisi, matris tipi ve ara yüz özellikleri gibi çeşitli faktörlerin delinme işlemi üzerinde etkisi vardır (Abrate, 2011).

4.2. Balistik Bilimi

Barutun Avrupa'da 13. yüzyılda kullanılmaya başlanması, insanların savaşta kullanılan silah ve tüfeklerin gelecekteki potansiyel gelişimlerini görmesini sağladı. Silahlar, savaş alanlarında uzun yıllar boyunca etkili olduğunu kanıtladı, ancak yıllar içerisinde savaşın doğası değişmeye başladı. 1853 yılında İngiliz Ordusuna verilen tüfeklerle birlikte, gerekli kararlılığı sağlamak ve daha iyi isabet olasılığı elde etmek için kurşunun namluda tutulması sağlandı. 1866'da Albay E.M. Boxer, hizmet için onaylanmış olan Snider kartuşunun patentini aldı. Kartuş, siyah toz ve bir saf kurşun mermi içeren, pirinç ile sarılmış Boxer kapsülünden yapıldı. Bu mühimmat, bugün kullanılan mühimmatın atasıydı. Mühimmat ve silahların geliştirilmesi günümüzde, hem sivillere hem de askeri personellere ateşli silahlara hızlı ve kolay erişim imkanı sunmakta, personel ve araçlar gibi hareketli ve hareketsiz hedeflere karşı kullanım için mühimmat çeşitliliği sağlamaktadır. Parçalayıcı mühimmatlar, hızlı gelişen teknoloji aracılığıyla da oldukça hızlı bir gelişme göstermiştir (Bhatnagar, 2016).

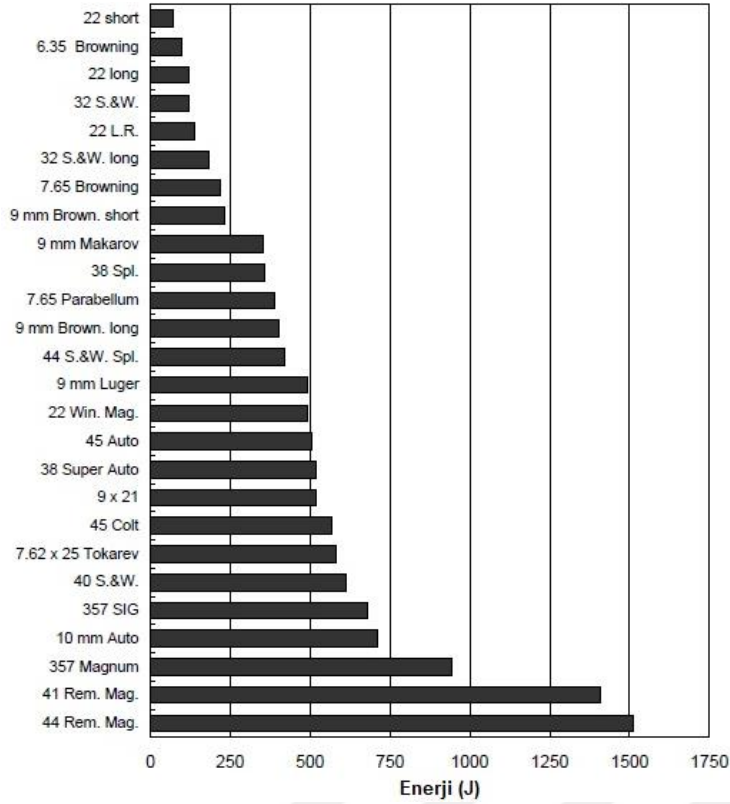
Olası tehditler o kadar çeşitlidir ki, koruyucu cihazlar her zaman belirli bir tehdit profiline uyarlanmak zorundadır. Sıklıkla meydana gelen tehdit, yüksek hızda etki eden ve etki potansiyeli kinetik enerjisinde bulunan kısa ve uzun silahlardan gelen mermiler tarafından oluşturulmaktadır. Kısa ve uzun namlu silah kategorisi, bir veya iki el ile kullanılabilen ve 13 mm'den küçük bir kalibreye sahip tüm silahları içerir. Çizelge 4.1'de genel silah

kategorileri gösterilmiştir. Farklı uygulama alanlarının bir sonucu olarak, çok sayıda farklı namlu enerji aralığına sahip silah kategorileri zaman içerisinde ortaya çıkmıştır. Bu, ortaya çıkan silahların sıklığı ile doğrudan ilişkilidir ki bu da tehdit olasılığı üzerinde büyük bir etkiye sahiptir (Kneubuehl, 2003).

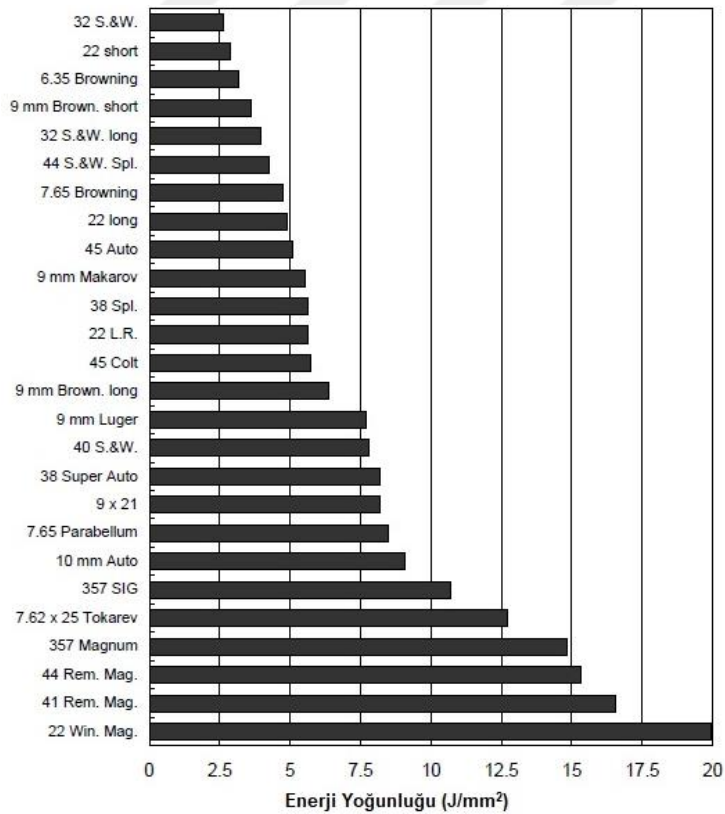
Çizelge 4.1. Genel silah kategorileri. Namlu enerjisi E_0 için standart değerler (Kneubuehl, 2003)

Silah kategorisi	Kalibre aralığı (mm)	Ortalama E_0 (J)	Maksimum E_0 (J)
Ticari kısa namlulu silahlar		500	750
Ağır kısa namlulu silahlar	< 12	1000	2500
Uzun namlulu silahlar (silahlı kuvvetler)	< 6,5 > 6,5	1600 3000 - 3500	1800 4000
Uzun namlulu silahlar (avcılık)	< 6,5 > 6,5	2000 4000 - 5500	3000 12000
Uzun namlulu silahlar (av tüfekleri)	12/70	2500	3500

Kısa ve uzun namlulu silahların bir sonucu olarak tehdit her zaman iki açıdan ele alınmalıdır. Bir yanda merminin tehdidi ve diğer yandan ilgili silahların yani ilgili tehdit gücünün dağılımı ve sıklığıdır. Tehdit kriteri, koruma yapımında kullanılan malzemeye bağlı olarak, merminin enerjisi ve enerji yoğunluğu ile belirlenir. Artık birçok farklı kalibrede silah ve mermi türü olduğu için, silahları saldırı potansiyeline göre sınıflandırmak gereklidir. 26 farklı kısa namlulu silah kalibrelerinin, nominal namlu enerjileri ve nominal namlu enerji yoğunlukları kaydedildiği takdirde, Şekil 4.2 ve 4.3’de gösterilen resimler elde edilir. Burada, geçişler oldukça net olarak görülebilir, bunlar yaklaşık 250 J, 500 J ve 750 J’dir. 750 J’nin üstünde, yalnızca birkaç farklı kalibrede silah vardır ve enerji kalibreden kalibreye nispeten güçlü bir şekilde artış gösterir (Kneubuehl, 2003).



Şekil 4.2. En yaygın tabanca kalibreleri ve nominal namlu enerjileri (Kneubuehl, 2003)



Şekil 4.3. En yaygın tabanca kalibreleri ve nominal namlu enerji yoğunlukları (Kneubuehl, 2003)

Balistik bilimini oluşturan 3 alt bilim dalı bulunmaktadır. Bunlar;

- İç balistik
- Dış balistik
- Terminal balistik.

İç balistik

İç balistik, merminin ateşlenmesi ile merminin silahın namlusundan çıkmadan önceki süreçte silahın, merminin ve itici yükün etkileşimi ile ilgilenir. İç balistik, itici gazın ateşleme sürecini, namludaki itici gazın yakılmasını, namlunun basınçlandırılmasını, merminin ilk hareket olayını, ateşleme sırasında mermi ve namlu dinamiklerini içermektedir (Carlucci, 2007).

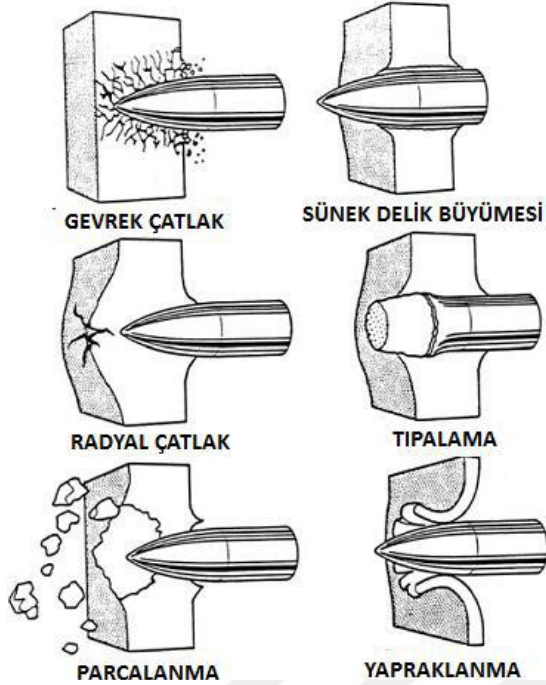
Dış balistik

Mermi, silahı çevreleyen atık gazların etkisi de dahil olmak üzere silahın çevresini terk ettikten sonra hedefe varıncaya kadar geçen süreç, dış balistik biliminin alanı içerisine girer. Burada, içinden geçtiği atmosferin basıncına, hava direncinin uyguladığı kuvvete, kendi etrafında gerçekleştirdiği dönüşün neden olduğu kuvvete ve yerçekimi nedeniyle meydana gelen kuvvete maruz kalmaktadır. Uçuştaki mermi, silah namlusunun duvarları tarafından yanal kuvvetlerle zorlanmadan serbest bir şekilde hareketini gerçekleştirebilir. Bu hareketlerin incelenmesi ve merminin hedefe doğru ilerlemesi esnasında gerçekleşen olaylar dış balistiğin konusudur (Carlucci, 2007).

Terminal balistik

Delinme, bir merminin hedefin orijinal yüzeyinde bir süreksizlik yarattığı olay olarak tanımlanır. Delik açma olayının gerçekleşebilmesi için, mermi veya kalıntılarının çıkarılmasından sonra, hedef boyunca ışığın görülebilmesi gerekir. Merminin uçuşunu tamamladıktan sonra hedefe çarptığı andan itibaren gösterdiği davranışlar, terminal balistik biliminin alanı içerisine girer. Terminal balistikteki etki, merminin tasarımına ve merminin yapması istenen görevine bağlıdır. Bu görevlerin en yaygın olanları şöyledir; mermi gövdesinin yüksek patlayıcı yüklerle parçalanması, kinetik veya kimyasal enerjinin uygulanmasıyla hedefin delinmesi, patlayıcı yükün kimyasal enerjisi tarafından hedef

alanda patlama sağlanmasıdır. Şekil 4.4’de merminin hedef üzerinde meydana getirdiği bazı hasar durumları gösterilmiştir (Carlucci, 2007).



Şekil 4.4. Merminin hedef üzerinde meydana getirdiği bazı hasar durumları (Karakoç, 2017)

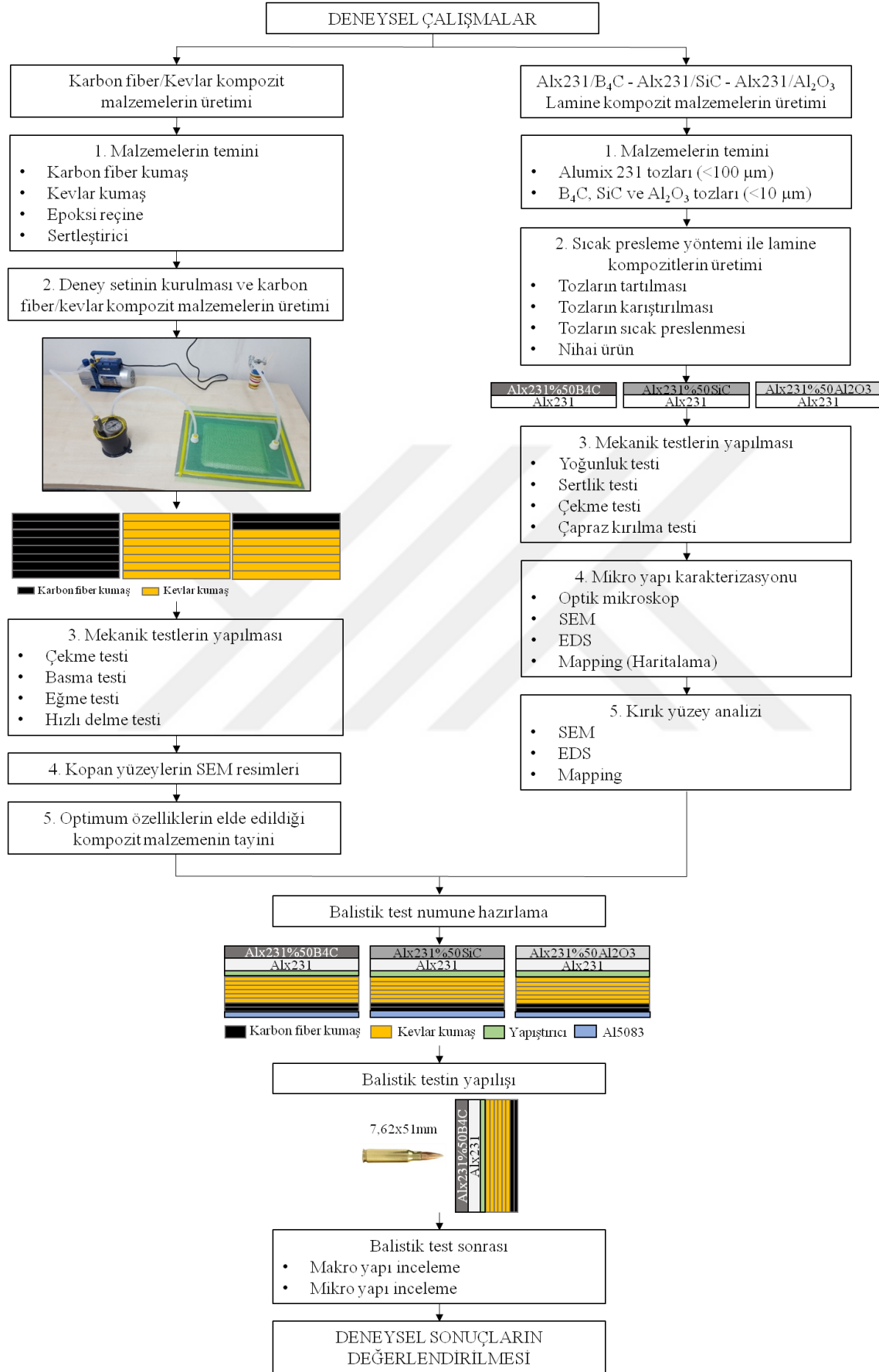
Delinme olayı gerçekleştiği esnada ve gerçekleştikten sonra birçok farklı etki meydana geldiğinden, terminal balistik bilimini tek başına incelemek mümkün değildir. Elde edilen bilgileri, diğer bilim dalları vasıtasıyla bir arada irdelemek gereklidir. Terminal balistik olgularının çoğu, stres dalgalarının katılardaki oluşumunu ve etkilerini içerdiğinden, bu alanın ayrıntılarını incelemek gereklidir. Katı hedeflerin kinetik enerji delinme teorilerini inceleyebilmek için ayrıca terminal balistik terminolojisinin kapsadığı etki mekanizmaları hakkında bilgi sahibi olunmalıdır. Bunlar; malzemelerin patlama, alev alma ve yanması, parçalanma teorileri, patlama etkileridir (Carlucci, 2007).



5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

5.1. Malzeme ve Metot

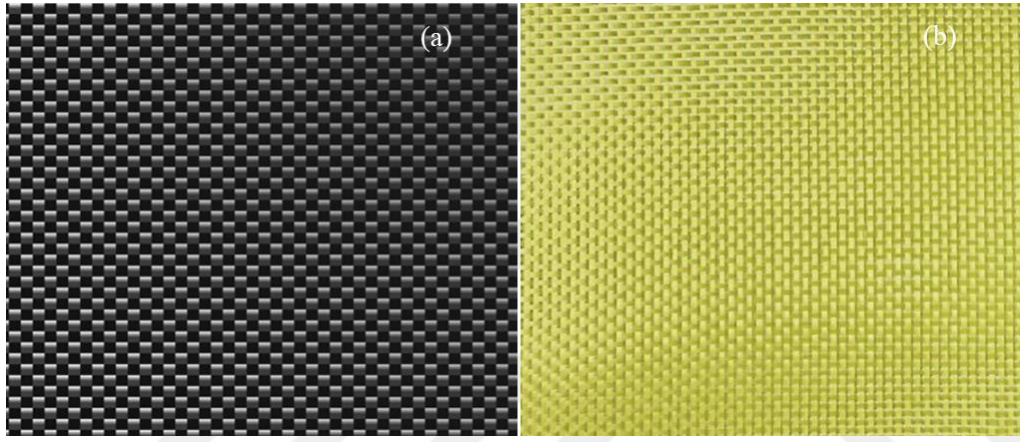
Yapılan çalışmada, lamine hibrid kompozit malzemeler üretildi. Lamine kompozit malzeme üretiminde polimer matrisli kompozit ve metal matrisli kompozit olmak üzere iki farklı kompozit malzeme grubu üretildi ve daha sonra bu kompozit malzemeler yapıştırıcı kullanılarak bir araya getirildi. Bu farklı iki tip kompozit malzemelerden biri kevlar/karbon fiber takviyeli kompozit malzemedir, diğeri ise Alumix231 (Al-Cu %2,5-Mg%0,5-Si %14) esaslı B₄C, SiC ve Al₂O₃ parçacık takviyeli lamine kompozit malzemedir. Kevlar/karbon fiber takviyeli kompozit malzemeler vakum infüzyon yöntemi kullanılarak üretildi. Bu kompozit malzemelerin üretiminde kevlar, karbon fiber, epoksi reçine ve sertleştirici kullanıldı. Kevlar, karbon fiber, kevlar/karbon fiber olmak üzere üç farklı polimer matrisli kompozit malzeme üretildi. Üretilen kompozit malzemelerin çekme testi, eğme testi, basma testi ve hızlı delme testi yapılarak mekanik özellikleri karakterize edildi. Mekanik testler esnasında kopan yüzeylerde Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) analizleri yapıldı. Mekanik özellikleri optimum seviyede olan ve en az maliyetli olan kompozit malzeme seçilerek balistik direnç testi için hazırlandı. Bu hazırlanan malzemeye 9x19mm mermi ile atış gerçekleştirildi. Metal matrisli kompozit malzemelerin üretilmesinde ise Alx231 (<100µm), B₄C (<10µm), SiC (<8µm) ve Al₂O₃ (<12µm) tozları kullanıldı. Bu metal ve seramik tozların toz boyut dağılımları ve şekilleri karakterize edildi. Metal matrisli lamine kompozitler sıcak presleme yöntemi kullanılarak üç farklı kombinasyonda üretildi. Bunlardan ilki Alx231/Alx231%50B₄C, ikincisi Alx231/Alx231%50SiC, üçüncüsü ise Alx231/Alx231%50Al₂O₃'dir. Bu kompozit malzemelerin yoğunluk testi, sertlik testi ve çapraz kırılma testi yapıldı. Mikro yapı özelliklerinin incelenmesinde optik mikroskop, SEM, EDX ve mapping analizleri yapıldı. Çapraz kırılma testi sonunda kopan yüzeler SEM ile incelendi. Bu kompozit malzemelerden balistik test için tekrar numune üretilerek, metal matrisli kompozit/polimer matrisli kompozit ve Al5083 alaşımı ile Şekil 5.1'de verilen şekilde bir araya getirilerek (yapıştırıcı ile) balistik kompozit levhalar üretildi. Bu hibrid lamine kompozit levhalar 7,62x51 mm mermiler karşısında test edilerek balistik dirençleri ölçüldü. Balistik test sonrası kopan yüzeylerde makro ve mikro boyutta incelemeler yapıldı. Son olarak deneysel sonuçlar tartışıldı. Bu çalışmada yapılan işlemlerin akış şeması Şekil 5.1'de verilmiştir.



Şekil 5.1. Deneysel çalışmalarda yapılan işlemlerin akış sırası

5.1.1. Polimer matrisli kompozitlerin üretiminde kullanılan malzemeler

Bu çalışmada takviye malzemesi olarak Tenax-E HTA 40 3k marka 200 g/m² dokuma karbon elyaf kumaş ve Twaron CT709 WR marka 200 g/m² kevlar balistik yelek kumaşı kullanıldı (Şekil 5.2). Bu ürünlerin özellikleri Çizelge 5.1 ve 5.2’de belirtilmiştir. Matris malzemesi olarak ise Hexion firması tarafından üretilen MGS LR160 epoksi reçine ve kürleme için MGS LH160 sertleştirici kullanıldı. Çizelge 5.3, 5.4 ve 5.5’de reçine ve sertleştiricinin özellikleri ile kürleme şartları verilmiştir.



Şekil 5.2. (a) Karbon fiber kumaş numunesi, (b) Kevlar kumaş numunesi

Çizelge 5.1. Tenax-E HTA 40 3k Karbon fiber kumaş özellikleri

Elyaf çapı [μm]	7
Yoğunluk [g/cm^3]	1,76
Çekme dayanımı [MPa]	3950
Elastisite modülü [GPa]	238
Kopmadaki birim boy değişimi [%]	1,7
Termal iletkenlik [W/mK]	17
Termal genleşme katsayısı [$10^{-6}/\text{K}$]	-0,1

Çizelge 5.2. Twaron CT709 WR kevlar kumaş özellikleri

Çekme modülü (GPa)	90
Çekme kuvveti (GPa)	3,6
Gerilim oranı (%)	4,0
Poisson oranı	0,3

Çizelge 5.3. MGS LR160 epoksi reçine özellikleri

Yoğunluk (g/cm ³)	1,13 - 1,17
Viskozite (mPa·s)	700 - 900
Refrakter endeksi	1,548 – 1,553

Çizelge 5.4. MGS LH160 sertleştirici özellikleri

Yoğunluk (g/cm ³)	0,96 - 1,00
Viskozite (mPa·s)	10 - 50
Refrakter endeksi	1,517 – 1,520

Çizelge 5.5. MGS LR160 ve MGS LH160 için kürlenme şartları

Ağırlıkça karışım	100 : 25 ± 2
Hacimce karışım	100 : 30 ± 2
Jel süresi (20 – 25°C)	3 - 4 saat
Jel süresi (40 – 45°C)	1 saat
Kürlenme süresi (23°C)	24 saat
Kürlenme süresi (80°C)	15 saat

5.1.2. Metal matrisli kompozitlerin üretiminde kullanılan malzemeler

Bu çalışmada matris malzemesi olarak ECKA firması tarafından üretilen Alumix 231 (Al-Cu %2,5-Mg %0,5-Si %14) tozları kullanıldı. Takviye elemanı olarak ise %99,5 saflıkta B₄C (<10µm), SiC (<8µm) ve Al₂O₃ (<12µm) tozları kullanıldı (Çizelge 5.6).

Çizelge 5.6. Karışım tozlarının fiziksel özellikleri

Malzeme	Fiziksel özellikler			
	Yoğunluk (g/cm ³)	Ergime sıcaklığı (°C)	Üretim Yöntemi	Ortalama toz tane boyutu (µm)
Alumix231	2,67	577	Gaz atomizasyon	<100
B ₄ C	2,52	2350	---	<10
SiC	3,10	2730	---	<8
Al ₂ O ₃	3,97	2040	---	<12

5.2. Kompozitlerin Üretimi

5.2.1. Polimer matrisli kompozitlerin üretimi

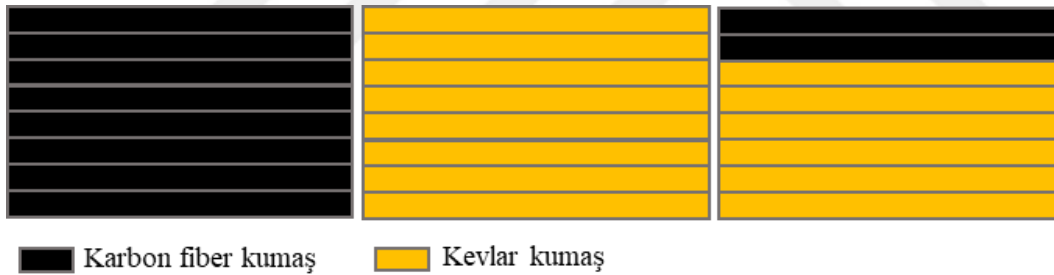
Karbon fiber ve kevlar kumaşın ayrı ayrı ve birlikte etkilerini araştırmak üzere kevlar, karbon fiber ve kevlar/karbon fiber takviyeli kompozit malzemeler vakum infüzyon yöntemi kullanılarak 250 mm x 250 mm boyutlarında plakalar halinde üretildi. Çekme, eğme ve basma testi için üretilen kompozitlerde standart kalınlığı sağlamak üzere 8 kat kumaş kullanıldı ve 2 mm kalınlığında parçalar elde edildi. Hızlı darbe testi için üretilen kompozitlerde ise 32 kat kumaş kullanıldı ve 8 mm kalınlığında parçalar elde edildi. Kullanılan karbon fiber ve kevlar kumaşların kat sayıları Çizelge 5.7’de verilmiştir. Bu çizelgedeki kumaş kat sayıları 2 mm kalınlığındaki parçalar için verildi, 8 mm kalınlıktaki kompozit parçalar için 4 katı miktarında kumaşlar kullanıldı. Aswani Kumar Bandaru vd. yaptıkları çalışmada farklı malzeme kombinasyonları kullanarak ürettikleri malzemelerin balistik limit ve enerji absorpsiyonunu araştırmışlardır. En yüksek balistik limiti ve en yüksek enerji absorpsiyonunu 8 kat karbon fiber ve 24 kat kevlar kullanarak elde etmişlerdir (Bandaru, 2015).

Çizelge 5.7. Kompozit plaka üretiminde kullanılan malzeme miktarları

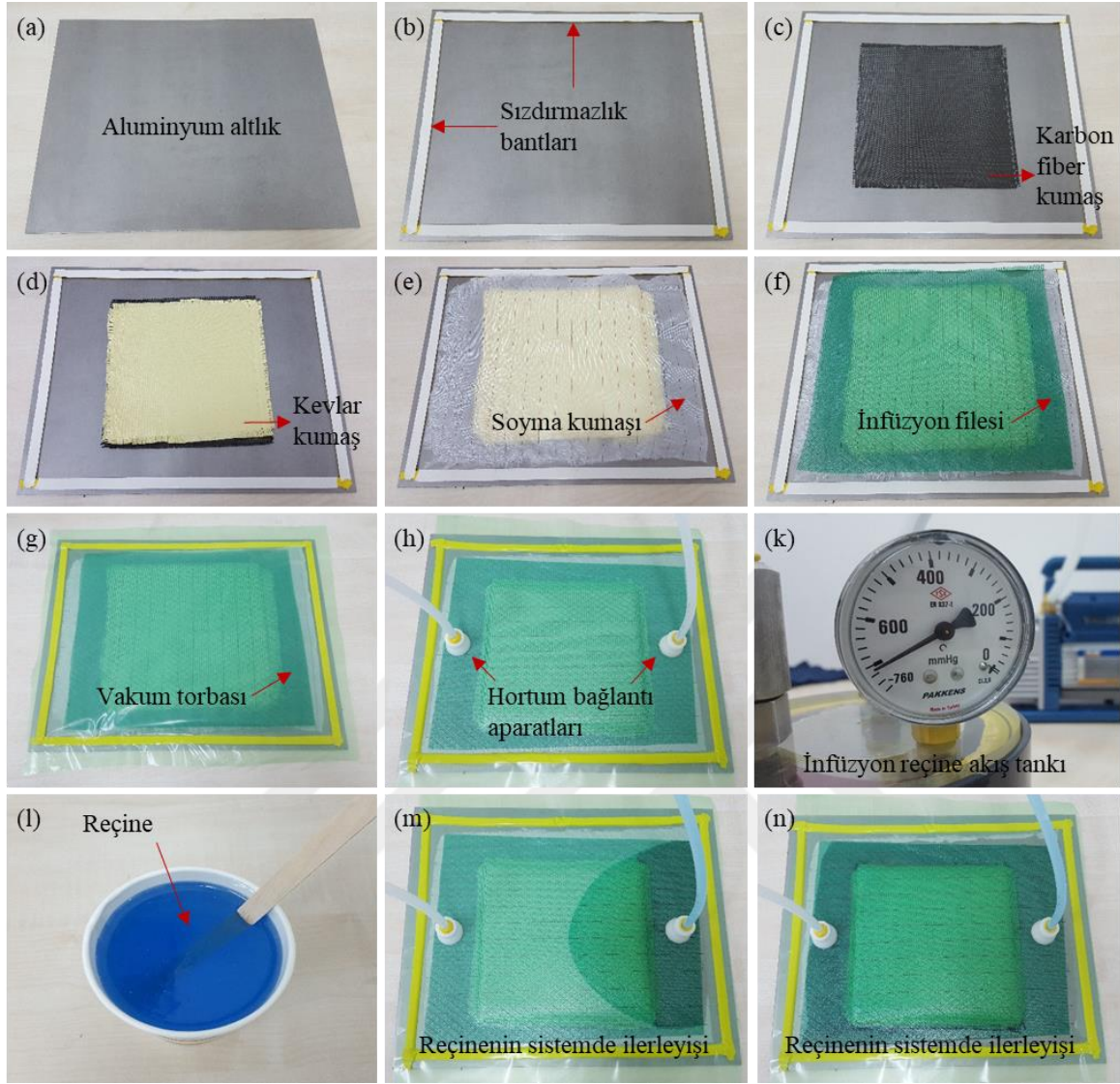
Malzeme	Elyaf Karbon fiber (gr)	Elyaf kevlar (gr)	Bor karbür (gr)	Reçine (gr)	Sertleştirici (gr)
Karbon fiber (8 kat)	100	--	--	35	11
Kevlar (8 kat)	--	100	--	38	12
Kevlar (6 kat) – karbon fiber (2 kat)	25	75	--	38	12

Bu üretimler sırasında farklı malzemeler kullanılarak 3 farklı tipte kompozit malzeme üretildi. Bunlar;

1. Karbon fiber kumaş/epoksi reçine
2. Kevlar kumaş/epoksi reçine
3. Karbon fiber ve kevlar kumaş/epoksi reçine (Şekil 5.3)



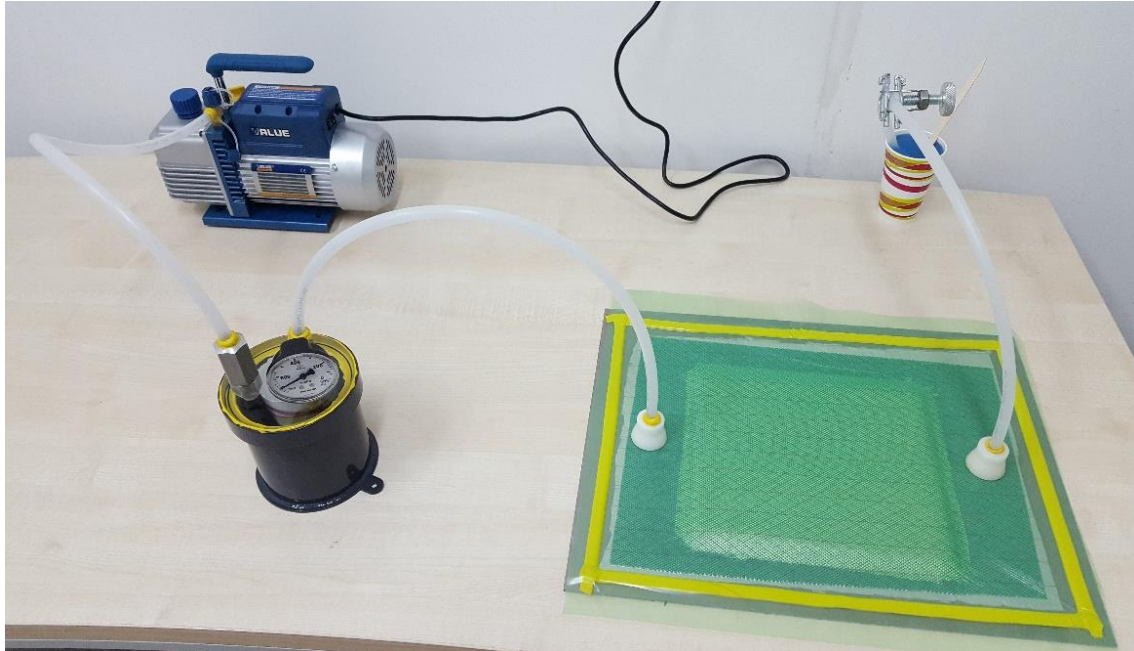
Şekil 5.3. 3 farklı tipte üretilen kompozit malzemenin şematik gösterimi



Şekil 5.4. Vakum infüzyon yöntemi ile kompozit malzemelerin üretilmesi

Şekil 5.4’de gösterildiği üzere kompozit malzeme üretiminde uygulanan aşamalar şu şekildedir: (a) Kompozit malzemelerin üretilmesi için Al plaka altlık olarak kullanıldı. Altlık üzerinde bulunan yağ ve kir, alkol ile tamamen temizlendi. Kompozit malzemenin kalıp olarak kullanılan Al altlıktan ayrılmasını kolaylaştırmak için Raku-Tool AC-9102 kalıp ayırıcı vaks, alüminyum plakanın üzerine bir bez yardımıyla ince bir tabaka halinde sürüldü. Bu işlem 2 defa yapıldı ve her uygulama arasında kalıp ayırıcının kuruması için 15 dakika beklendi. (b) Altlık ile vakum torbası arasında hava sızdırmazlığını sağlayan sızdırmazlık bantları altlık üzerine çekildi. (c) Karbon fiber kumaş 250 mm x 250 mm boyutlarında kesildi ve altlık üzerine yerleştirildi. (d) Kevlar kumaş karbon fiber kumaşın üzerine yerleştirildi. (e) Soyma kumaşı reçinenin kürlenmesinden sonra kumaşların infüzyon filesine yapışmasını önlemek amacıyla kullanılmıştır. Soyma kumaşı karbon fiber

ve kevlar kumaştan bir miktar büyük boyutta olacak şekilde kesildi ve kumaşın üzerine yerleştirildi. (f) İnfüzyon filesi soyma kumaşıyla benzer ölçüde kesilerek soyma kumaşı üzerine yerleştirildi. İnfüzyon filesi reçinenin sistemde ilerlemesi ve reçine içinde bulunan hava kabarcıklarının sistemden çıkışının kolaylaştırılması için kullanılmıştır. (g) Vakum torbası altlığın tamamını kaplayacak boyutlarda kesilip yerleştirildi ve sızdırmazlık bantlarına yapıştırıldı. (h) Hortum bağlantı aparatları sızdırmazlık bandı yardımıyla vakum torbası üzerinde açılan reçine ve vakum deliklerine yapıştırıldı. Bağlantı aparatlarına hortumlar monte edildi ve sızdırmazlık bandı sayesinde olası hava kaçakları önlendi. (k) İnfüzyon reçine akış tankı monte edildikten sonra Value VE135N marka vakum pompası yardımıyla vakum torbası içerisindeki hava vakumlandı ve sistemin basıncı -700 mmHg'ya düşürüldü. (l) Reçine ve sertleştirici uygun oranda karıştırılıp hazırlandı. (m ve n) Hazırlanan reçine, giriş hortumundan sisteme gönderilerek bütün sistemi doldurması ve kumaşların reçine tarafından ıslatılması sağlandı. Sistemde bulunan fazlalık reçine vakumlandıktan sonra giriş ve çıkış hortumları kapatılarak sistemin vakumunun korunması sağlanmıştır. Kurlenme işleminin gerçekleşmesi için sistem 24 saat süreyle 23°C'deki ortamda bekletildi (Resim 5.1). Yapılan bu işlemlerin tamamı Şekil 5.3'de gösterilen 3 farklı tipteki kompozit malzeme için tekrarlanmıştır.



Resim 5.1. Vakum infüzyon ünitesi resmi

Kompozit malzeme üretiminde kullanılan sarf malzemelerin listesi Çizelge 5.8’de verilmiştir. Value VE135N marka vakum pompasına ait özellikler Çizelge 5.9’da verilmiştir.

Çizelge 5.8. Kullanılan sarf malzemeleri

Kalıp ayırıcı	Raku-Tool AC-9102
Sızdırmazlık bandı	-
Soyma kumaşı	Kumaş Poliamid 83 g/m ²
İnfüzyon filesi	FH-5052 256 g/m ² (Yeşil renk)
Vakum torbası	-
İnfüzyon vakum hortumu	Polietilen – 10 mm x 12 mm
İnfüzyon reçine akış tankı	1 lt

Çizelge 5.9. Value VE135N vakum pompası özellikleri

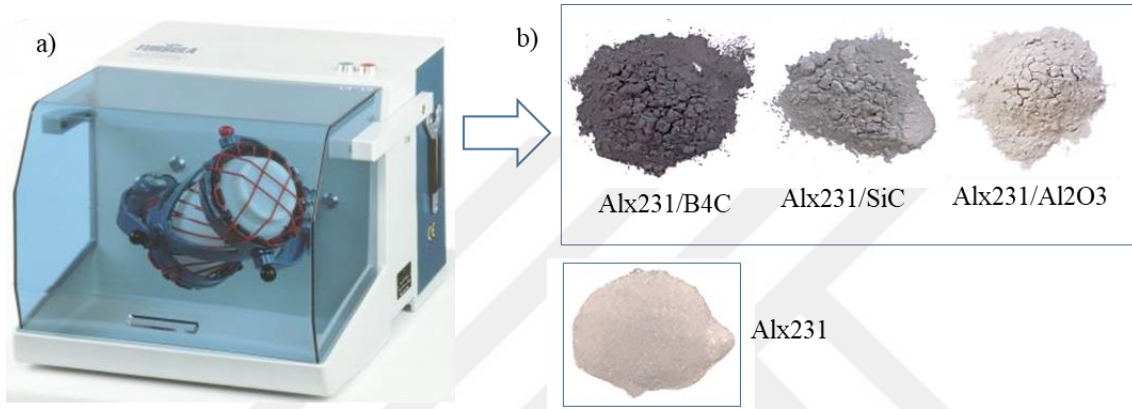
Akış hızı	113L/dk
Kısmi basınç	2 Pa
Toplam basınç	150 mikron
Güç	1/3 HP
Elektrik beslemesi	220 V

5.2.2. Metal matrisli kompozitlerin üretimi

Metal matrisli lamine kompozit malzemelerin üretimi Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü Laboratuvarı’nda gerçekleştirildi. Üretim için Toz Metalurjisi Laboratuvarı’nda bulunan hassas terazi, Turbola marka üç boyutlu karıştırıcı, hidrolik pres ve sıcak presleme ünitesi kullanıldı. Mekanik özelliklerin belirlenmesinde 90x40x6,35 mm ebatlarında sıcak presleme numuneleri üretildi. Ayrıca balistik test için çapı 100 mm, kalınlığı 25,4 mm olan sıcak presleme numuneleri üretildi. Bu üretimlerin gerçekleştirilmesi için iki ayrı sıcak presleme kalıbı kullanıldı. Kompozitlerin üretiminde sırası ile aşağıdaki işlemler yapıldı;

Tozların hazırlanması

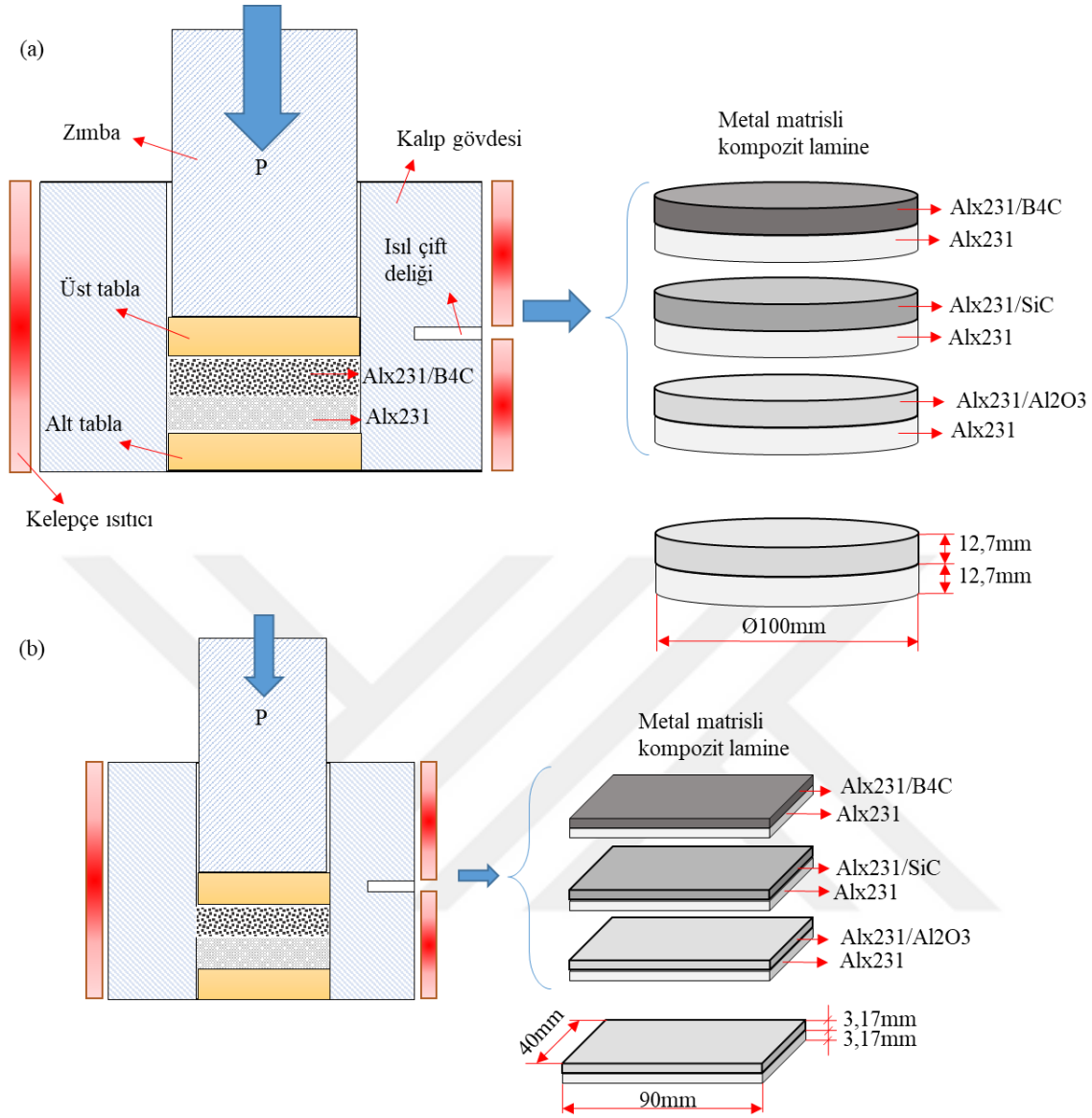
Alumix231 tozları ile ağırlıkça %50 oranında B_4C , SiC ve Al_2O_3 tozları 0,1 mg hassasiyetindeki Precisa marka hassas terazi kullanılarak tartıldı ve 3 farklı toz karışımı elde edildi. Tartılan tozlar Turbola marka T2 F tipi üç boyutlu karıştırıcıda 30 dakika boyunca karıştırıldı (Şekil 5.5(a)). Alumix231 tozları ve ağırlıkça %50 oranında B_4C , SiC ve Al_2O_3 içeren Alumix231 alaşım tozlarının görünümleri Şekil 5.5(b)'de verilmiştir.



Şekil 5.5. (a) Turbola T2 F tipi üç boyutlu toz karıştırıcı, (b) Ağırlıkça %50 oranında B_4C , SiC ve Al_2O_3 içeren karışım tozlar

Sıcak presleme işlemi

Sıcak presleme işlemi, Toz Metalurjisi Laboratuvarı'nda bulunan 260 ton presleme kapasitesine sahip hidrolik pres ile gerçekleştirildi. Mekanik test numunelerin üretilmesi için parça ölçüleri 40x90mm olan özel olarak tasarlanmış sıcak presleme kalıbı kullanıldı (Şekil 5.6(b)). Balistik test numunelerinin üretilmesi için iç çapı 100mm olan sıcak presleme kalıbı kullanıldı (Şekil 5.6(a)). 3 boyutlu karıştırıcıda hazırlanan toz karışımları sıcak presleme kalıbı içerisine konuldu. Kalıp boşluğuna ilk olarak Alx231 tozu, sonrasında Alx231%50 B_4C tozları döküldü. Sıcak presleme yapılmadan önce tozlar soğuk olarak 50 MPa basınç altında tek yönlü ön bir kuvvet ile preslendi. Daha sonra sıcak presleme ünitesi çalıştırılarak dakikada 10°C ısıtma hızında kalıp sıcaklığı 550°C'ye getirildi. Kalıp sıcaklığı 550°C'ye geldiğinde 200 MPa basınç altında 30 dakika boyunca sıcak presleme işlemi yapıldı. Her toz karışımı için kalıp temizlenerek aynı işlemler tekrarlandı ve sıcak presleme işlemleri sonrasında Alx231/Alx231%50 B_4C , Alx231/Alx231%50SiC, Alx231/Alx231%50 Al_2O_3 lamine kompozit malzemeler üretildi.



Şekil 5.6. Sıcak presleme yöntemi ile lamine kompozit malzemelerin üretilmesi

5.3. Numunelerin Karakterizasyonu

5.3.1. Polimer matrisli kompozit numunelerin karakterizasyonu

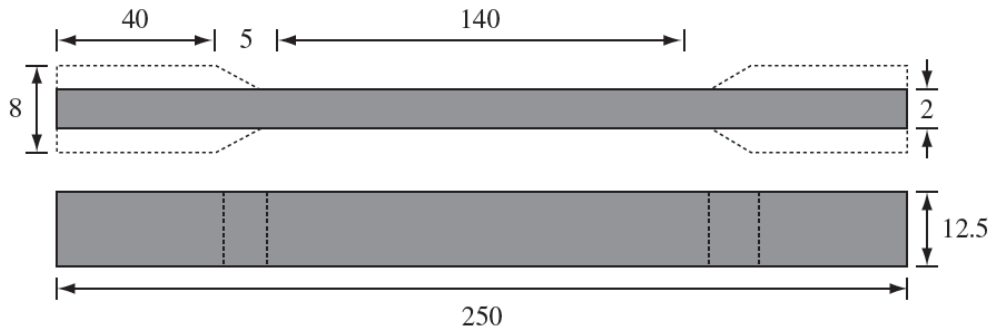
250 mm x 250 mm boyutlarında plakalar halinde üretilen kompozitler su jeti ile kesilerek yapılacak testler için uygun boyutlarda numuneler elde edildi. Çekme, eğme ve basma testi için üretilen numuneler 2 mm kalınlığında, hızlı darbe testi için üretilen numuneler ise 8 mm kalınlığındadır. Üretilen deney numunelerinin adetleri Çizelge 5.10’da verilmiştir.

Çizelge 5.10. Üretilen numune adetleri

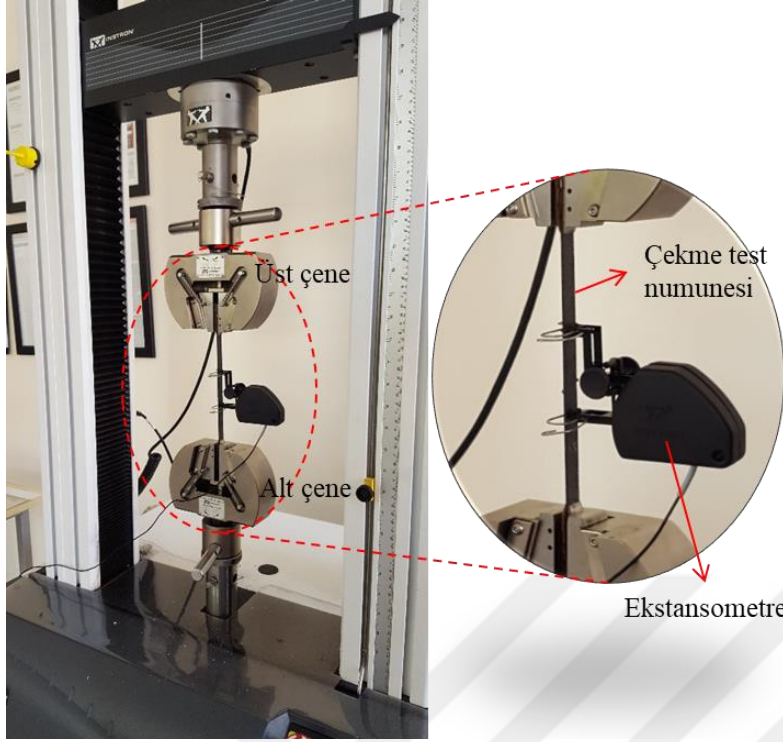
Numuneler	Yapılan Testler				Toplam
	Çekme Testi	Eğme Testi	Basma Testi	Hızlı Darbe Testi	
Karbon	3	3	3	-	9
Kevlar	3	3	3	-	9
Karbon/Kevlar	3	3	3	8	17

Çekme testi

Çekme testinde kullanılan numuneler ASTM D3039 standardına uygun olarak hazırlandı. Tutma çeneleri St 52 çelik malzemeden üretildi ve uç kısımlarına 45° açı verildi (Şekil 5.7). Çeneleri numunelere yapıştırmak için Araldite AW 106 ve Araldite Hardener HV 953 U BD yapıştırıcı karışımı kullanıldı. Sonrasında yapıştırıcının kürlenme işleminin gerçekleşmesi için 24 saat 23°C'deki ortamda bekletildi. Hazırlanan numuneler Gazi Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Laboratuvarı'nda bulunan INSTRON 3369 universal test cihazında 1mm/dk çekme hızında çekme testine tabi tutuldu (Şekil 5.8).



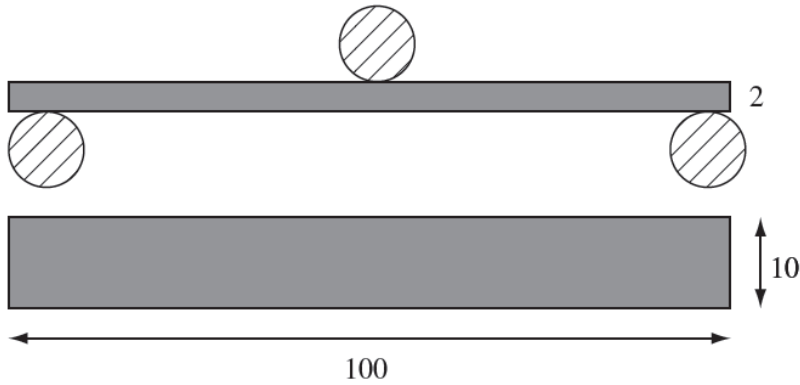
Şekil 5.7. ASTM D3039 standardındaki çekme test numunesinin şematik gösterimi (Srinivasa, 2010)



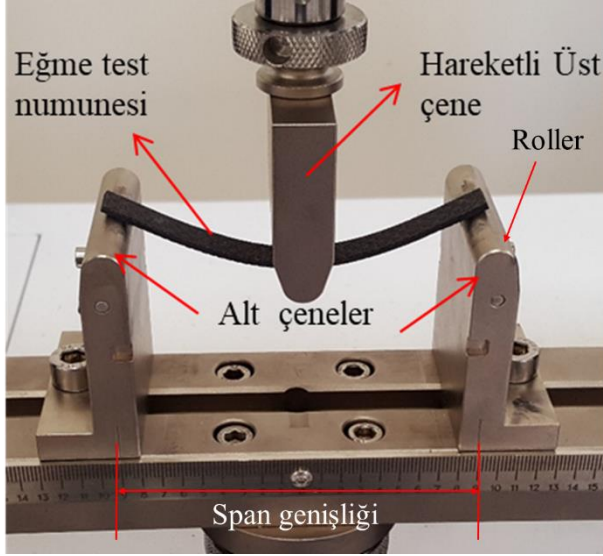
Şekil 5.8. Çekme test düzeneği

Eğme testi

Eğme testinde kullanılan numuneler ASTM D790 standardına uygun olarak hazırlandı. Hazırlanan numuneler Gazi Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Laboratuvarı'nda bulunan INSTRON 3369 üniversal test cihazında roller çapı 2 mm ve span genişliği 18 mm olan aparat kullanılarak 1mm/dk eğme hızında eğme testine tabi tutuldu (Şekil 5.9, Şekil 5.10).



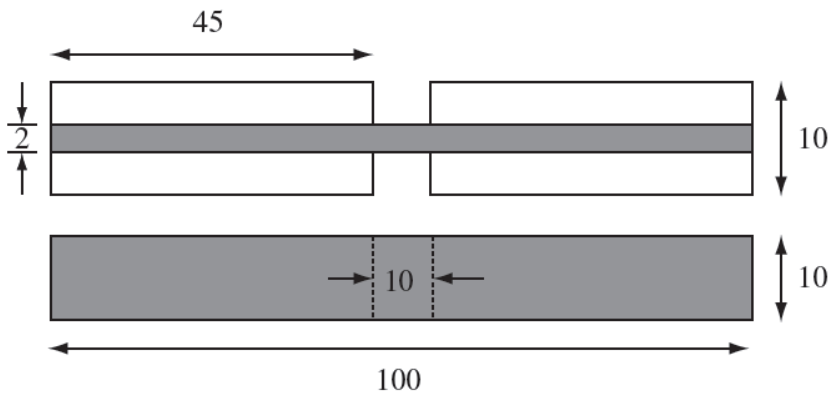
Şekil 5.9. ASTM D790 standardındaki eğme test numunesinin şematik gösterimi (Srinivasa, 2010)



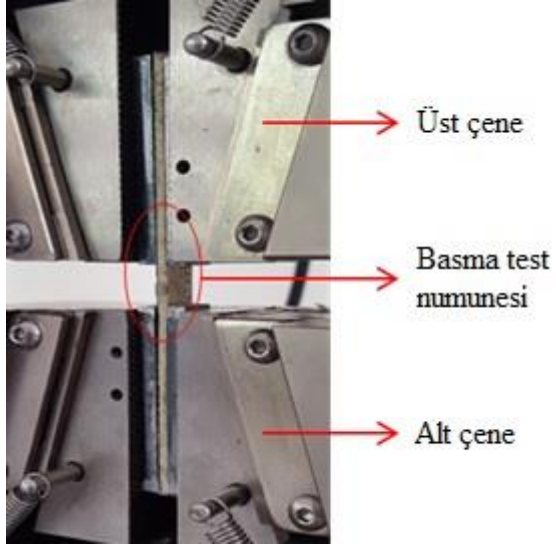
Şekil 5.10. Eğme testi düzeneği

Basma testi

Basma testinde kullanılan numuneler ASTM D3410 standardına uygun olarak hazırlandı (Şekil 5.11). ST 52 çelik malzemeden üretilen tutma çeneleri, Araldite AW 106 ve Araldite Hardener HV 953 U BD yapıştırıcı karışımı kullanılarak yapıştırıldı. Hazırlanan numuneler Gazi Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Laboratuvarı'nda bulunan INSTRON 3369 universal test cihazında 1mm/dk basma hızında basma testine tabi tutuldu (Şekil 5.12).



Şekil 5.11. ASTM D3410 standardındaki basma test numunesinin şematik gösterimi (Srinivasa, 2010)



Şekil 5.12. Basma test düzeneği

Hızlı darbe testi

Bu çalışmada, hızlı darbe testinde kullanılan numuneler 60 mm x 60 mm boyutlarında üretildi. Hazırlanan numuneler Hitit Üniversitesi Bilimsel Teknik Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde bulunan Instron/Ceast 9350 test cihazında hızlı darbe testine tabi tutuldu (Resim 5.2). Numunelere 80, 120, 160 ve 240J enerji uygulanarak testler gerçekleştirildi.



Resim 5.2. Hızlı darbe test cihazı

5.3.2. Metal matrisli kompozit numunelerin karakterizasyonu

Yoğunluk ölçümü

Üretilen metal matrisli kompozit lamine malzemelerin yoğunluk ölçümleri 0,1 mg hassasiyetindeki Sartorius marka hassas yoğunluk ölçme kitinde ve Arşiment prensibine göre yapıldı. Arşiment prensibine göre yoğunluk ölçme formülü Eşitlik 1’de verilmiştir. Kompozit malzemelerin teorik yoğunluk hesaplamaları kompozit malzemelerin ağırlıkça % bileşimlerine bağlı kalınarak hesaplandı.

$$\rho^* = \frac{m_{hava}}{m_{hava} - m_{su}} \quad (1)$$

Bu eşitlikte;

ρ^* = Malzemenin yoğunluğunu (g/cm^3),

m_{hava} = Malzemenin havadaki ağırlığını (g),

m_{su} = Malzenin su içerisindeki ağırlığını (g) ifade etmektedir.

Mikroyapı analizleri

Sıcak presleme sonrası elde edilen lamine kompozit malzemelerden, Gazi Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü Metalografi Laboratuvarı’nda bulunan abrasiv kesici ile kesilerek mikro yapı incelemesi için numune alındı. Kesilen numuneler bakalite sıcak gömme yapılarak kalıplandı. Sıcak gömme yapılan lamine kompozit malzemelerin yüzeyleri sırası ile 400, 600, 800, 1000 ve 1200 numaralı zımparalar ile sulu ortamda zımparalandı. Zımparalama sonrası üç farklı keçede 6, 3 ve 1 μm ’lik elmas süspansiyon ile parlatma işlemleri gerçekleştirildi. Numunelerin dağlanması Alüminyum alaşımlarında en çok tercih edilen Keller (1ml HF + 200 ml H₂O) reaktifi ile yapıldı. Dağlayıcıya daldırılan numune 15 saniye süre ile dağlandı. Dağlama sonrası numuneler optik mikroskopta görüntü oluşturabilecek seviyeye geldi. Numunelerin mikroyapı görüntülerinin alınması işlemi Leica DM4000M marka optik mikroskopta gerçekleştirildi (Resim 5.3(a)). Üretilen kompozit levhalarda takviye malzemeleri (B₄C, SiC ve Al₂O₃) ile ana malzeme (Alumix231) arasındaki ara yüzey bağ uyumunu görebilmek için JEOL JSM

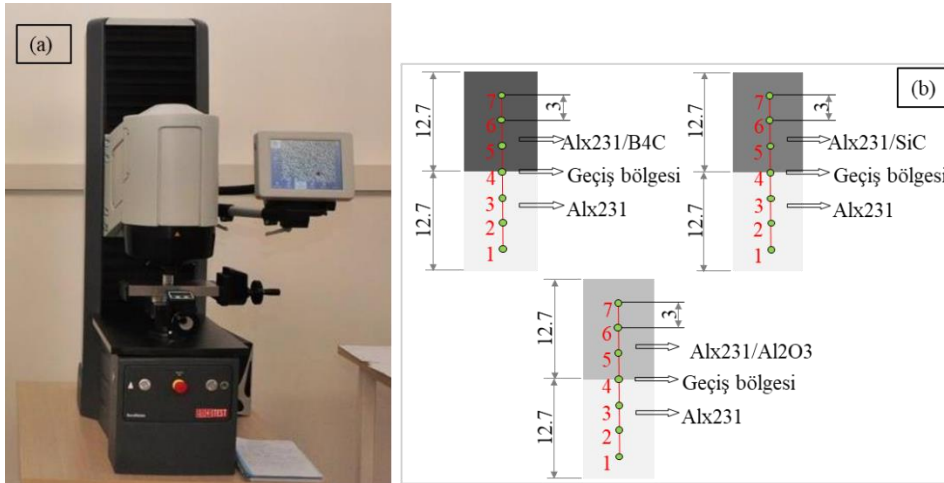
6060LV marka taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanıldı ve aynı cihazda EDS analizleri yapıldı (Resim 5.3(b)).



Resim 5.3. (a) Leica DM4000M optik mikroskop, (b) JEOL JSM 6060LV marka taramalı elektron mikroskobu

Sertlik testi

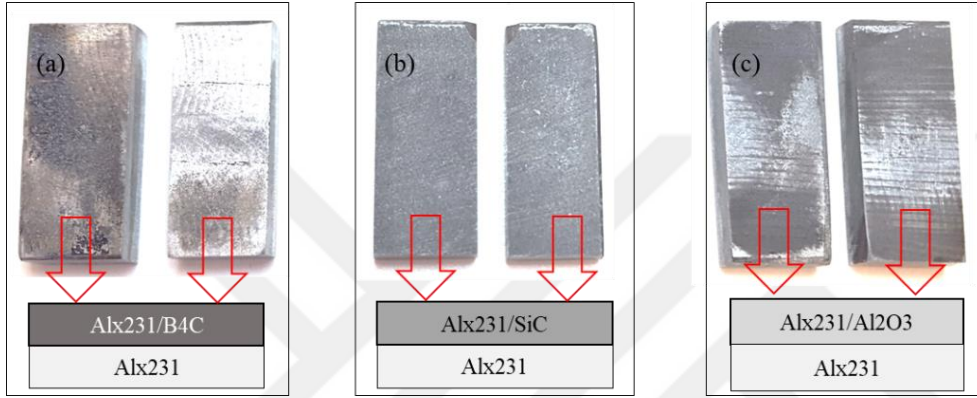
Mikroyapı resimleri alındıktan sonra yine aynı numuneler üzerinden sertlik değerleri alındı. Sertlik ölçümlerinde Brinell sertlik ölçme yöntemi kullanıldı. Sertlik ölçümleri Gazi Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Laboratuvarı'nda bulunan EMCO TEST Duravision 200 marka sertlik ölçüm cihazında 2,5 mm bilye uç ve 31,25 kgf yük uygulanarak gerçekleştirildi (Şekil 5.13(a)). Numunelerin sertlikleri Şekil 5.13(b)'de verildiği gibi Alx231 tarafından başlanarak numaralandırıldığı sırayla düz bir hat üzerinde 3 mm aralıklarla alındı.



Şekil 5.13. (a) EMCO TEST Duravision 200 marka sertlik ölçüm cihazı, (b) üretilen kompozit numunelerin sertlik alınan bölgeleri

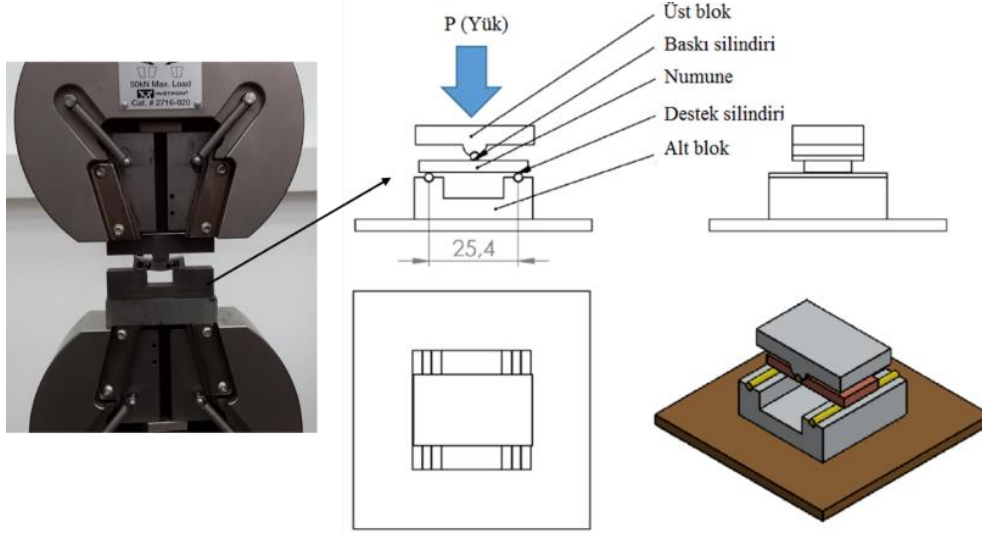
Çapraz kırılma testi

Üretilen kompozit malzemelerin içerisinde mekanik çapraz kırılma testi için Şekil 5.14’de gösterildiği üzere üçer adet numune alındı. Mekanik test numunelerinin hazırlanmasında CNC tel erezyon makinesi kullanıldı. Çapraz kırılma deneyleri için kullanılacak test numuneleri MPFI-41,1998 standartlarına uygun olarak 31,7x12,7x6,35mm boyutlarında hazırlandı.



Şekil 5.14. (a) Alx231/Alx231+%50B₄C, (b) Alx231/Alx231+%50SiC, (c) Alx231/Alx231+%50Al₂O₃ mekanik test numunelerin ön ve arka yüzlerinden alınan görüntüler

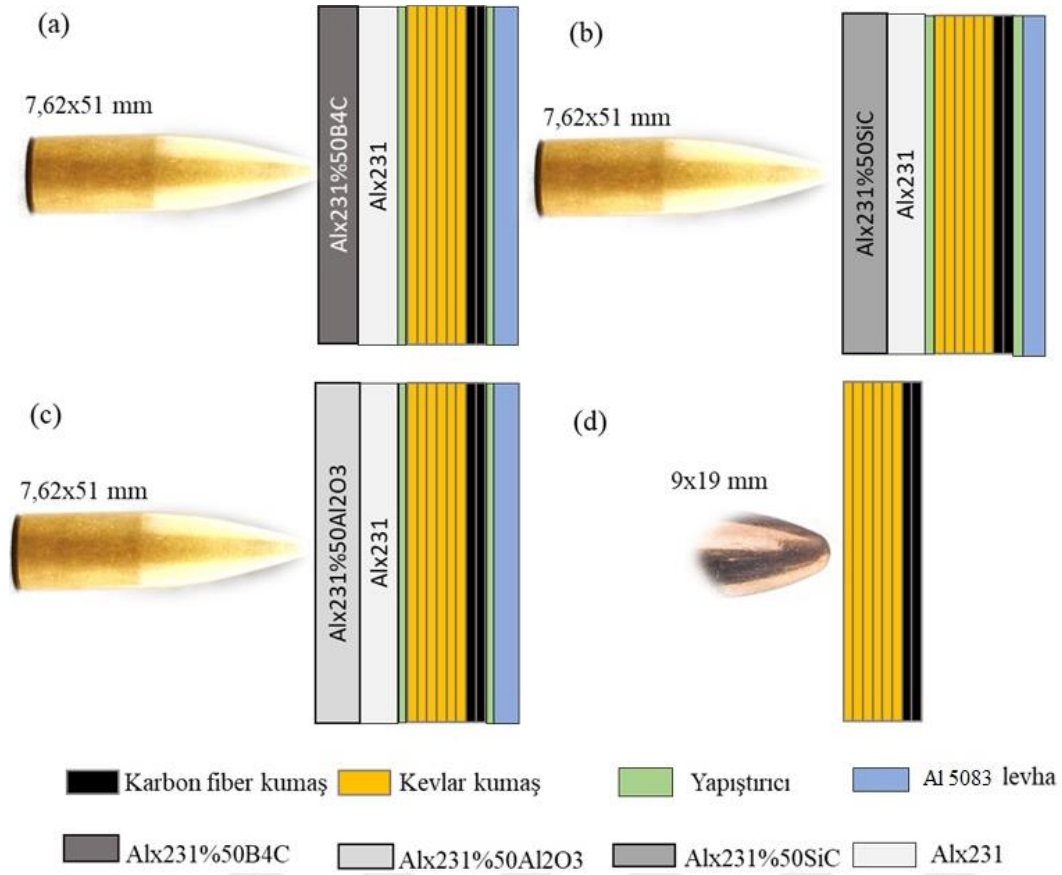
Şekil 5.15’de Metal Powder Industries Federation standartlarına göre hazırlanmış çapraz kırılma numune boyutları verildi. Yapılan çalışmada hazırlanan test numunelerinin çapraz kırılma deneyleri Gazi Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Laboratuvarı’nda bulunan Instron 3369 model 50 kN çekme ve basma kapasitesine sahip universal test cihazında özel olarak hazırlanan çapraz kırılma aparatı kullanılarak gerçekleştirildi (Şekil 5.15). Bu deney grubu için 3’er adet numune kullanıldı. Deneyler oda sıcaklığında ve 1 mm/dakika hızda gerçekleştirildi.



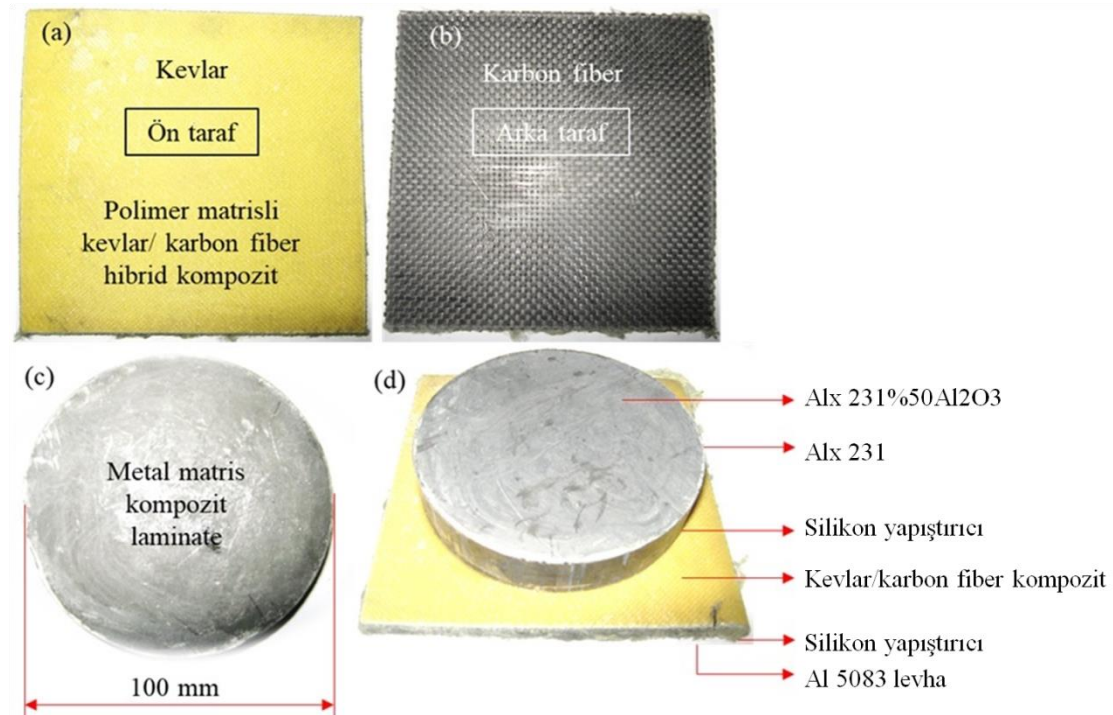
Şekil 5.15. Çapraz kırılma testinin şematik olarak gösterimi (Karakoç, 2017)

5.4. Balistik Test

Vakum infüzyon yöntemi ile üretilen polimer matrisli kompozit malzemeler arasından optimum mekanik özellikleri sağlayan kevlar/karbon fiber kompozit malzeme balistik test için seçildi. Bu polimer matrisli kompozit malzeme ile metal matrisli lamine kompozit silikon yapıştırıcı ile birleştirilerek bir araya getirildi. Ayrıca polimer matrisli kompozit levhanın arka tarafına 4 mm kalınlığında Al5083 levha yerleştirildi. Dolayısı ile ön tarafta metal matris kompozit lamine orta kısımda polimer matris kompozit malzeme ve en arka tarafta ise Al5083 levha kullanılarak tabakalı hibrid kompozit malzeme üretildi. Balistik test numuneleri $Al_{x231}/Al_{x231}+\%50B_4C$, $Al_{x231}/Al_{x231}+\%50SiC$ ve $Al_{x231}/Al_{x231}+\%50Al_2O_3$ olmak üzere 3 farklı birleşimde üretildi. Bu üç malzemeye MPT-76 Milli Piyade Tüfeği ile ve 7,62x51 mm yumuşak uçlu mermilerle atış yapıldı. Ayrıca kevlar/karbon fiber hibrid kompozit malzemelere de MP5-A3 Makinalı Tabanca ile ve 9x19 mm mermilerle atış yapıldı (Şekil 5.16 ve Şekil 5.17).



Şekil 5.16. Lamine hibrid balistik test numuneleri (a) 1. Tip, (b) 2. Tip, (c) 3. Tip (d) kevlar/karbon fiber hibrid kompozit



Şekil 5.17. Balistik test numuneleri

Çizelge 5.11. Balistik test yapılan levhasal kompozit malzemeler

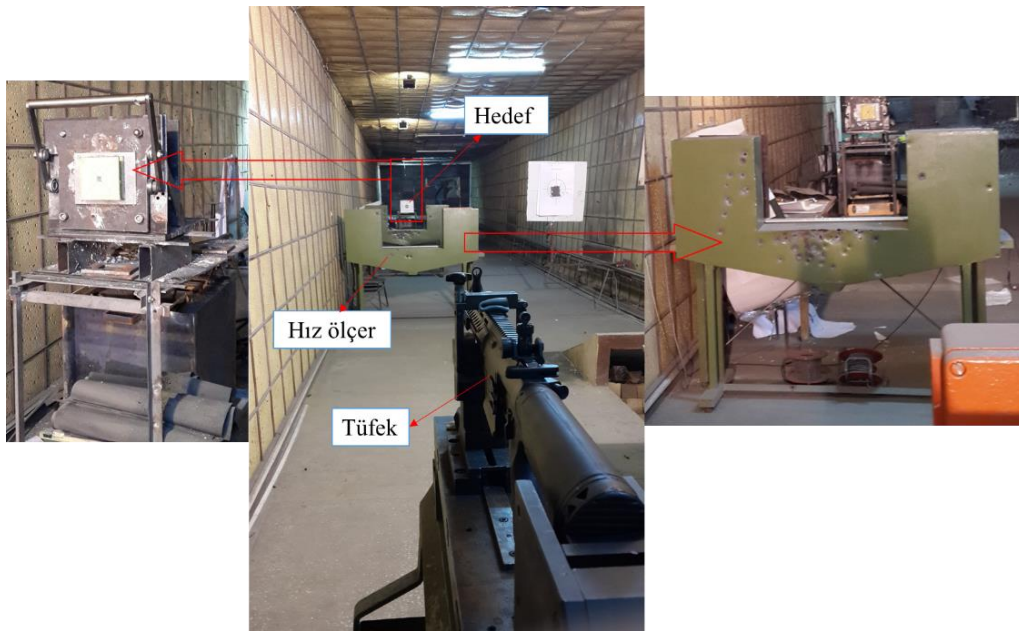
Numune kodu	Deney Numuneleri	Üretim Yolu	Tabaka	Malzeme	Kalınlık	Birleştirme	Atış testi
N1	Metal matrisli lamine kompozit malzeme	Sıcak presleme	Tabaka 1	Alumix231 + %50B ₄ C	12,7mm	Silikon ile birleştirme	7,62x51 mm (M80)
			Tabaka 2	Alumix231	12,7mm		
	Polimer matrisli kompozit malzeme	Vakum infüzyon	Tabaka 1	Kevlar	6 mm		
			Tabaka 2	Karbon fiber	2 mm		
	Al5083 levha	Hazır levha	----	Al5083	4 mm		
N2	Metal matrisli lamine kompozit malzeme	Sıcak presleme	Tabaka 1	Alumix231 + %50SiC	12,7mm	Silikon ile birleştirme	7,62x51 mm (M80)
			Tabaka 2	Alumix231	12,7mm		
	Polimer matrisli kompozit malzeme	Vakum infüzyon	Tabaka 1	Kevlar	6 mm		
			Tabaka 2	Karbon fiber	2 mm		
	Al5083 levha	Hazır levha	----	Al5083	4 mm		
N3	Metal matrisli lamine kompozit malzeme	Sıcak presleme	Tabaka 1	Alumix231 + %50Al ₂ O ₃	12,7mm	Silikon ile birleştirme	7,62x51 mm (M80)
			Tabaka 2	Alumix231	12,7mm		
	Polimer matrisli kompozit malzeme	Vakum infüzyon	Tabaka 1	Kevlar	6 mm		
			Tabaka 2	Karbon fiber	2 mm		
	Al5083 levha	Hazır levha	----	Al5083	4 mm		
N4	Polimer matrisli kompozit malzeme	Vakum infüzyon	Tabaka 1	Kevlar	6 mm	----	9x19mm
			Tabaka 2	Karbon fiber	2 mm		

Balistik atışlar için Şekil 5.17’de de gösterildiği üzere 100x100 mm kesit alanına sahip 4 malzeme grubu hazırlandı. 1,2 ve 3. grup malzemelere (N1, N2 ve N3 nolu numuneler) 7,62x51 mm (M80) yumuşak uçlu mermiler ile Amerikan NIJ 0101.06 Uluslararası Standardı Seviye III’e göre balistik testler yapıldı. 4. Grup (N4 nolu numune) ise 9x19 mm

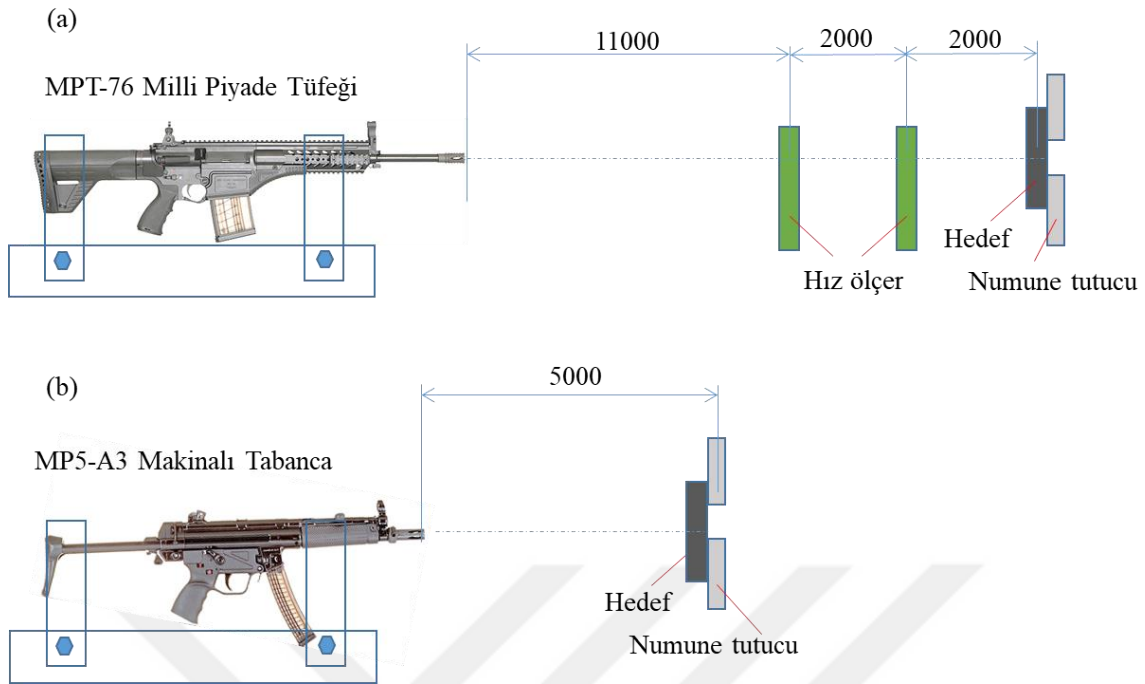
mermiler ile Seviye II'ye göre testler yapıldı. Balistik deneylere ait detaylı bilgi Çizelge 5.11'de verilmiştir. Atış sonrası malzemelerin makro incelemesi ve SEM analizleri gerçekleştirildi.

Balistik test atışlarında iki farklı tüfek kullanıldı. Deneysel çalışmalarda kullanılan tüfekler Şekil 5.19'da verilmiştir. MP5-A3 tüfeği ile 9x19 mm çap ve tipinde standart normal uçlu mermi çekirdeğine sahip MKE yapımı fişekler kullanıldı. MPT-76 tüfeği ile 7,62x51 mm çap ve tipinde (M80) yumuşak uçlu mermi çekirdeğine sahip MKE yapımı fişekler kullanıldı.

7,62x51mm mermilerle yapılan balistik testler Kırıkkale Makine Kimya Endüstrisi Kurumu'nda silah atış poligonunda, 9x19mm mermilerle yapılan balistik testler Garanti Kompozit firmasında gerçekleştirildi (Şekil 5.18). Atış poligonu deney düzeneğinin şematik görünümü Şekil 5.19'da verilmiştir. Hedef ile silahının namlusu arasındaki mesafe 10 metre olarak alındı ve atış yapılmadan önce kompozit malzemeler hedef düzeneğine mengene yardımı ile sabitlendi. 10 metre mesafe uzaklıktaki koruyucu kabinde bulunan uzman tarafından hedef numunelere atış yapıldı. Atışlar numune yüzeylerine dik olarak (90°) yapıldı.



Şekil 5.18. Atış poligonuna ait görünüm



Şekil 5.19. Makine kimya endüstrisi kurumu atış poligonunun şematik olarak gösterimi (a) MPT-76 Milli Piyade Tüfeği ile atış (b) MP5-A3 Makinalı Tabanca ile atış

Kullanılan mermilere ait resimler Şekil 5.20’de verilmiştir. Mermilere ait detaylı fiziksel özellikler ise Çizelge 5.12 ve Çizelge 5.13’de ayrıca verilmiştir.



Şekil 5.20. (a) 7,62 mm x51 (M80) normal fişek ve (b) 9 mmx19 parabellum tabanca fişegi (Karakoç, 2017; Alizadeh, 2013)

Çizelge 5.12. 7,62x51mm (M80) normal fişek özellikleri (Alizadeh, 2013)

Fişek Boyu	71,12 mm
Fişek Ağırlığı	~ 24,5 g
Hız (23,7 M)	838 ± 9,1 m/s
Mermi İrtibat Kuvveti	min. 27 kgf (265 N)
Kovan Model Numarası	7,62x51mm kovan
Kovan Malzemesi	Pirinç (CuZn28 veya CuZn30)
Mermi Malzemesi	Tombak, kurşun çekirdek (kurşun-antimon alaşımı)
Barut	Küresel barut
Kullanıldığı Silah	G3, FAL, MG3, L7A2, M60
Mermi Ağırlığı	9,65 - 0,20 g

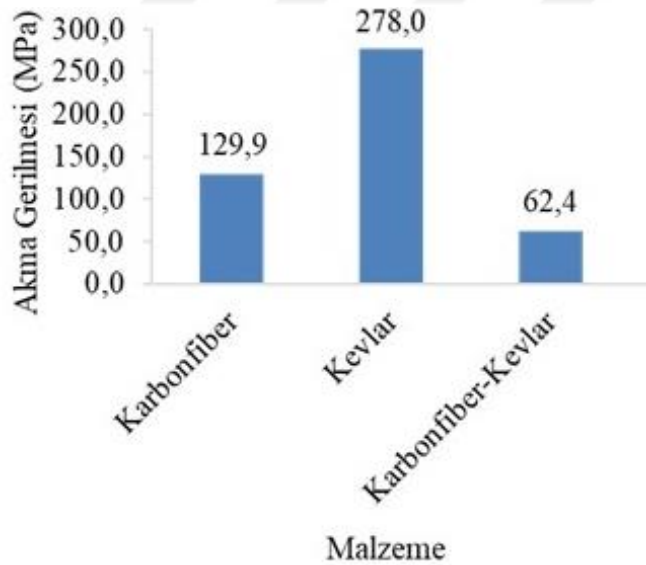
Çizelge 5.13. 9x19mm parabellum tabanca fişek özellikleri (Alizadeh, 2013)

Fişek Boyu	29,69 – 0,3 mm
Fişek Ağırlığı	~12,15 g
Hız	370± 10 m/s (16 m'de)
Mermi İrtibat Kuvveti	min. 20,4 kgf
Kovan Model Numarası	9x19mm parabellum kovan
Mermi Tipi	Fmj, mermi gömlek yüksüğü pirinç (CuZn36), mermi çekirdeği kurşun-antimon alaşımı
Mermi Ağırlığı	8 ± 0,075 g
Kovan Malzemesi	Pirinç (CuZn30)
Kapsül	9 mm kapsül, boxer
Barut	Küresel barut
Kullanıldığı Silah	9mm Belçika browning, 9mm p1 alman walther, 9mm pm 12s İtalyan Beretta(hafif makinalı), 9mm 92f İtalyan Beretta, 9mm CZ 75, 9 mm Ruger, 9 mm Astra, 9mm MP-5 makinalı tüfek

6. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA

6.1. PMK Numunelerin Çekme Test Sonuçları

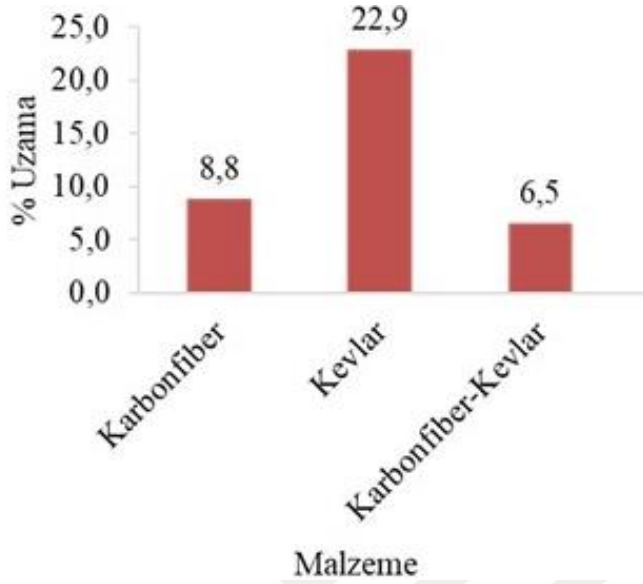
Kompozit malzemelerin çekme testi sonrası oluşan akma gerilmesi değerleri Şekil 6.1’de verilmiştir. Şekle baktığımızda en yüksek akma dayanım değerinin kevlar kompozit malzemesine ait ve 278 MPa değerinde olduğu gözlemlenirken, en düşük akma dayanımının ise 62,4 MPa ile karbon fiber/kevlar kompozit malzemesinde olduğu gözlemlendi. Karbon fiber ile kevların akma dayanımını kıyasladığımızda, kevların akma dayanımının karbon fibere göre daha yüksek olduğu gözlemlendi. Bu durum karbon fiberin kevlarlara göre daha sert ve kırılgan olmasından kaynaklanmaktadır. Karbon fiber/kevlar birleşiminin akma dayanımının düşük çıkmasının sebebi, karbon fiberin akma dayanımının düşük olmasından dolayı önce akma göstermekte ve kevlarların düşük kesit alanından dolayı daha düşük dayanım göstermesidir. Karbon fiber/kevlar birleşiminde kevlar 6 kat olduğu için 8 kat sadece kevlar olan malzemeye göre daha az gerilmeye dayanabilmiş ve akma dayanımı grafikte de görüldüğü üzere düşük çıkmıştır.



Şekil 6.1. Üretilen kompozitlerin akma dayanım değerleri

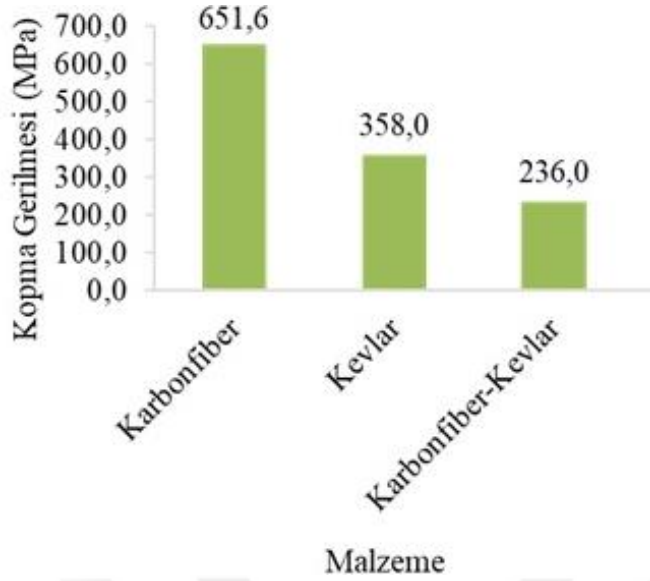
Kompozit malzemelerin % uzama değerlerini incelediğimizde akma gerilmesine benzer bir grafiğin oluştuğu ve en yüksek uzama değerinin kevlar takviyeli kompozitte olduğu gözlemlendi (Şekil 6.2). Bu durumun, kevlarların karbon fiber gibi net bir biçimde kopmadan sünerek şekil değiştirmesinden dolayı meydana geldiği düşünülmektedir. Karbon

fiber/keklar birleşiminin grafikte düşük değere sahip olması ise akma dayanımına benzer şekilde, karbon fiberin % uzamasının düşük olması kekların uzamasını sınırlamış ve uzama yükü 6 kat keklar üzerinde yoğunlaşmıştır.



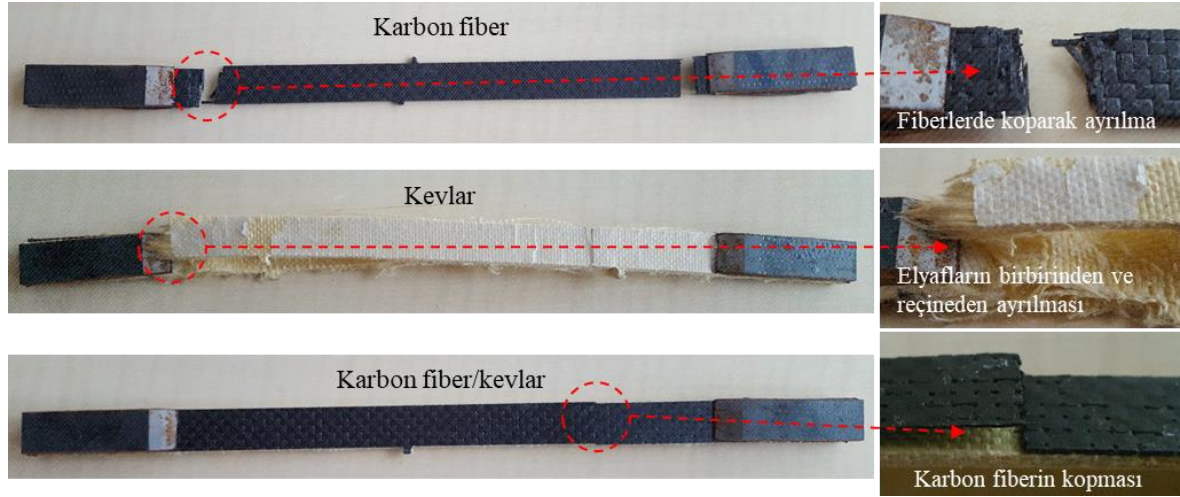
Şekil 6.2. Üretilen kompozitlerin % uzama değerleri

Kompozitlerin kopma dayanımlarını birbirleri ile kıyasladığımızda en yüksek kopma dayanımının 652 MPa ile karbon fiber takviyeli kompozit malzemede olduğu gözlemlendi, en düşük kopma dayanımının ise karbon fiber/keklar kompozit malzemesinde ve 236 MPa değerinde olduğu gözlendi (Şekil 6.3). Karbon fiber/keklar birleşiminde ise keklar düşük kopma gerilmesi göstermiş, kalan yük 2 kat karbon fiber tarafından üstlenilmiştir. Bu nedenle 2 kat karbon fiber, 8 kat karbon fiber malzemeye göre daha düşük yüke dayanabilmiş ve neticede grafikte de görüldüğü üzere en düşük kopma gerilmesini vermiştir.



Şekil 6.3. Üretilen kompozitlerin kopma dayanım değerleri

Şekil 6.4’de yer alan çekme test sonrası kırılan uçları incelediğimizde, sadece karbon fiber takviyeli olan kompozit malzemelerin net bir biçimde enine koptuğu gözlemlendi. Bu durum karbon elyaflarının sert ve kırılkan olmasından kaynaklanmaktadır. Sadece kevlar takviyeli olan kompozit malzemeyi incelediğimizde ise elyaf tabakalarının sünmesinden dolayı takviyenin reçineden ayrıldığı ve lifleşerek kopmanın meydana geldiği gözlemlendi. Karbon fiber/kevlar kompozitte ise çekme anında karbon fiber ile kevlar kumaşın birbirlerinin ara yüzeyinden ayrıldığı ve çekme kuvvetine bağlı olarak karbon fiberlerin koptuğu görüldü. Karbon fiber/kevlar kompozit malzemedeki kevlarların ve karbon fiberin elastikiyet modülleri birbirinden farklı olduğundan çekme anında kevlar daha fazla elastik uzama sergilerken karbon fiber daha az uzama sergilemiştir. İki malzeme arasındaki bu uzama farkından dolayı karbon fiber daha fazla uzayamamış ve kopma meydana gelmiştir. Böylece toplam katman sayısı azalan karma kompozit malzemenin akma gerilmesinde, % uzama miktarında ve kopma gerilmesinde düşüş meydana gelmiştir. Paiva ve Ark. yapmış oldukları benzer bir çalışmada polimer matrisli karbon fiber takviyeli (0/90° düz dokuma) kompozit malzemeler üretmişler ve çekme testi sonrası karbon fiberlerin net bir şekilde kopma sergilediğini görmüşlerdir (Paiva, 2006; ASTM, 2008).



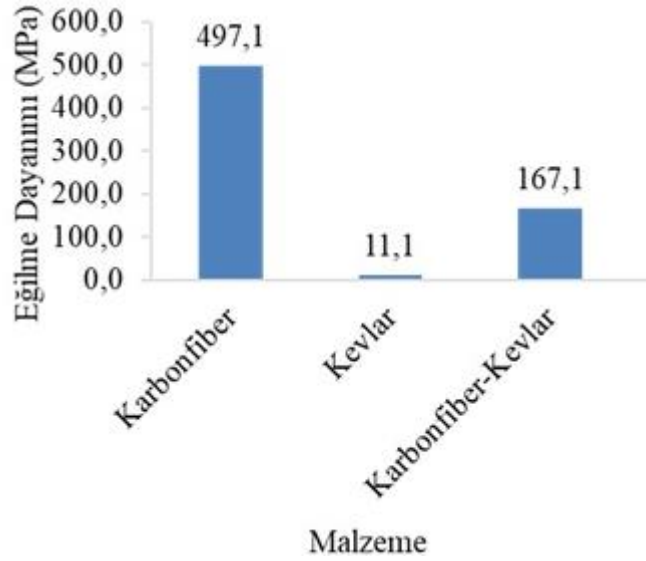
Şekil 6.4. Çekme test sonrası kırılan numuneler

6.2. PMK Numunelerin Eğme Test Sonuçları

Üretilen kompozit plakalara uygulanan eğme testinden, eğilme dayanımı ve eğilme gerinim değerleri elde edildi (Şekil 6.6 ve Şekil 6.7). Kompozitlerde en yüksek eğilme dayanımının karbon fiber takviyeli kompozit malzemede 500 MPa olduğu tespit edilirken, en düşük eğilme dayanımının ise kevlar takviyeli kompozit malzemede 11 MPa değerinde olduğu tespit edildi (Şekil 6.6). Kevların daha sünek yapısından dolayı daha düşük eğilme dayanımına sahip olmuştur. Karbon fiber/kevlar kompozit malzeme birleşiminde karbon fiber takviyesinin daha yüksek dayanıma sahip olmasından dolayı kevların eğilme dayanımını artırmıştır. Kompozit levhaların eğilme testi sonrası görüntüleri Şekil 6.5’de verilmiştir. Dickson ve Ark. yapmış oldukları çalışmada polimer matrisli sürekli karbon, cam ve kevlar fiber takviyeli kompozit malzemelerin eğilme dayanımlarını incelemişlerdir. Benzer bir sonuç elde ederek karbon fiberin mukavemetinin kevlardan yüksek çıktığını görmüşlerdir (Dickson, 2017).

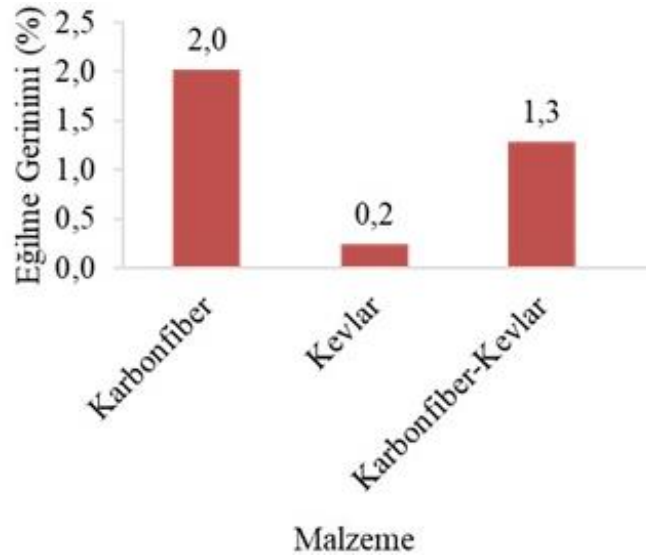


Şekil 6.5. Eğme testi sonrası makro resimler



Şekil 6.6. Üretilen kompozitlerin eğilme dayanım değerleri

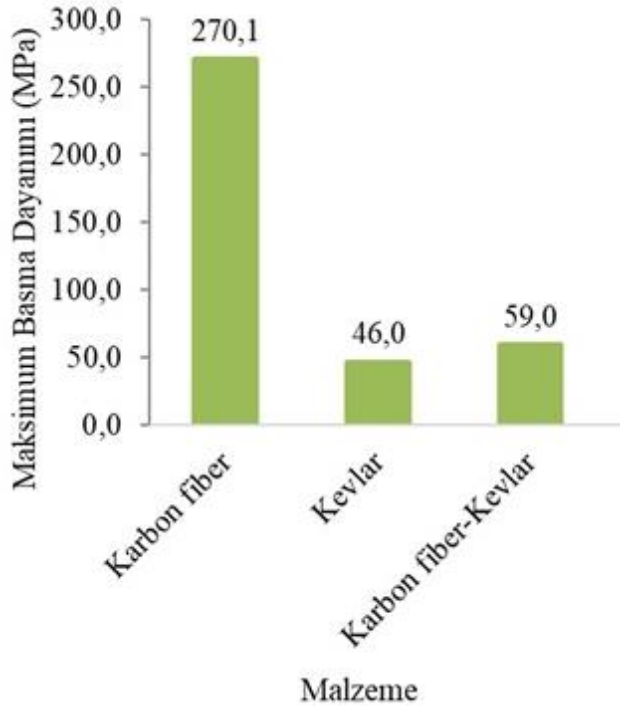
Kompozitlerin eğilme gerinim değerlerini incelediğimizde en yüksek eğilme gerinimi karbon fiber takviyeli kompozitlerde, en düşük eğilme gerinimi ise kevlar takviyeli kompozitte meydana geldi (Şekil 6.7). Karbon fiber/kevlar kompozit malzeme birleşiminde karbon fiber takviyesi kevların eğilme gerinimini artırmış ve grafikte de görüldüğü gibi ara değerde çıkmasını sağlamıştır.



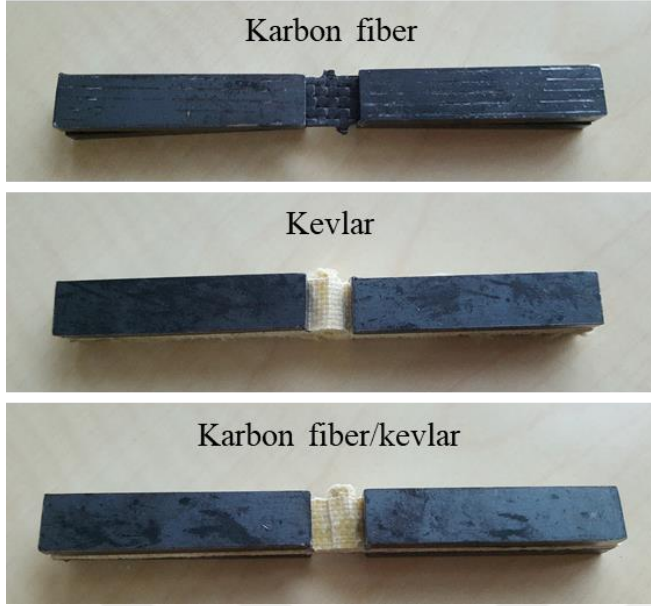
Şekil 6.7. Üretilen kompozitlerin eğilme gerinim değerleri

6.3. PMK Numunelerin Basma Test Sonuçları

Kompozitlerde en yüksek basma dayanımı 270 MPa değeri ile karbon fiber takviyeli kompozitlerde gözlemlendi. En düşük basma dayanımı ise 46 MPa değeri ile kevlar takviyeli kompozitlerde meydana geldi. Karbon fiber/kevlar kompozit malzemede ise basma dayanım değerleri kevlar kompozit malzemeden bir miktar yüksek çıktı (Şekil 6.8). Bunun nedeni, karbon fiber/kevlar kompozit malzeme birleşiminde karbon fiber takviyesinin daha yüksek dayanıma sahip olmasından dolayı kevların basma dayanımını artırmasıdır. Kompozit levhaların basma test sonrası görüntüleri Şekil 6.9’da verilmiştir. Kevlar kompozit malzemelerin avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. Düşük basma dayanımı ise kevlar kompozitlerin dezavantajlarını oluşturmaktadır (Aramid Fiber Advantages-Disadvantages, 2019).



Şekil 6.8. Üretilen kompozitlerin maksimum basma dayanım değerleri



Şekil 6.9. Basma test sonrası makro resimler

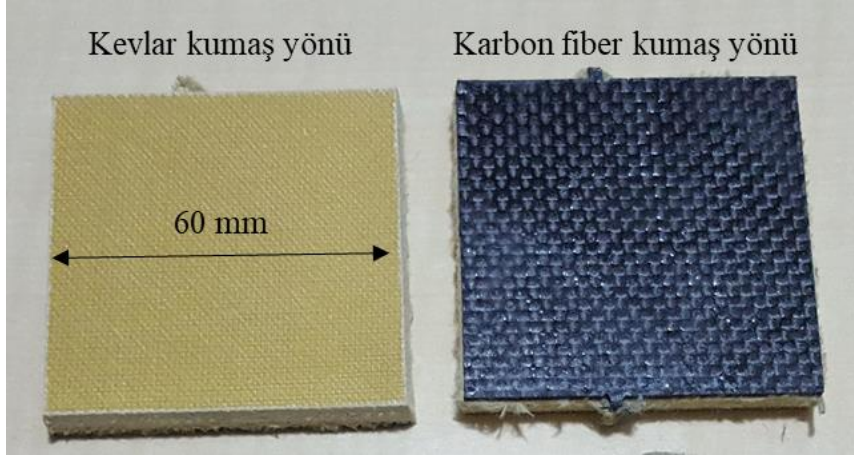
6.4. PMK Malzemelerin Hızlı Darbe Testi Sonuçları

Kompozit levhaların darbe dayanımlarını araştırmak amacı ile 2 farklı tipte malzemeye delme testi yapıldı. Bunlar;

1. Karbon fiber (ön) - kevlar (arka) kompozit malzeme
2. Kevlar (ön) - karbon fiber (arka) kompozit malzeme

Parantez içerisinde (ön) yazan kısım testin uygulandığı yönü belirtmektedir. Hızlı darbe testi için hazırlanan 60x60x8mm ebatlarındaki kompozit levhaların makro görüntüleri Şekil 6.10'da verilmiştir. Polimer matrisli 0°/90° yönlü iki eksenli karbon fiber/kevlar elyaf takviyeli kompozit malzemelerin darbe testleri sonrasında elde edilen sonuçları ve grafikleri incelendi.

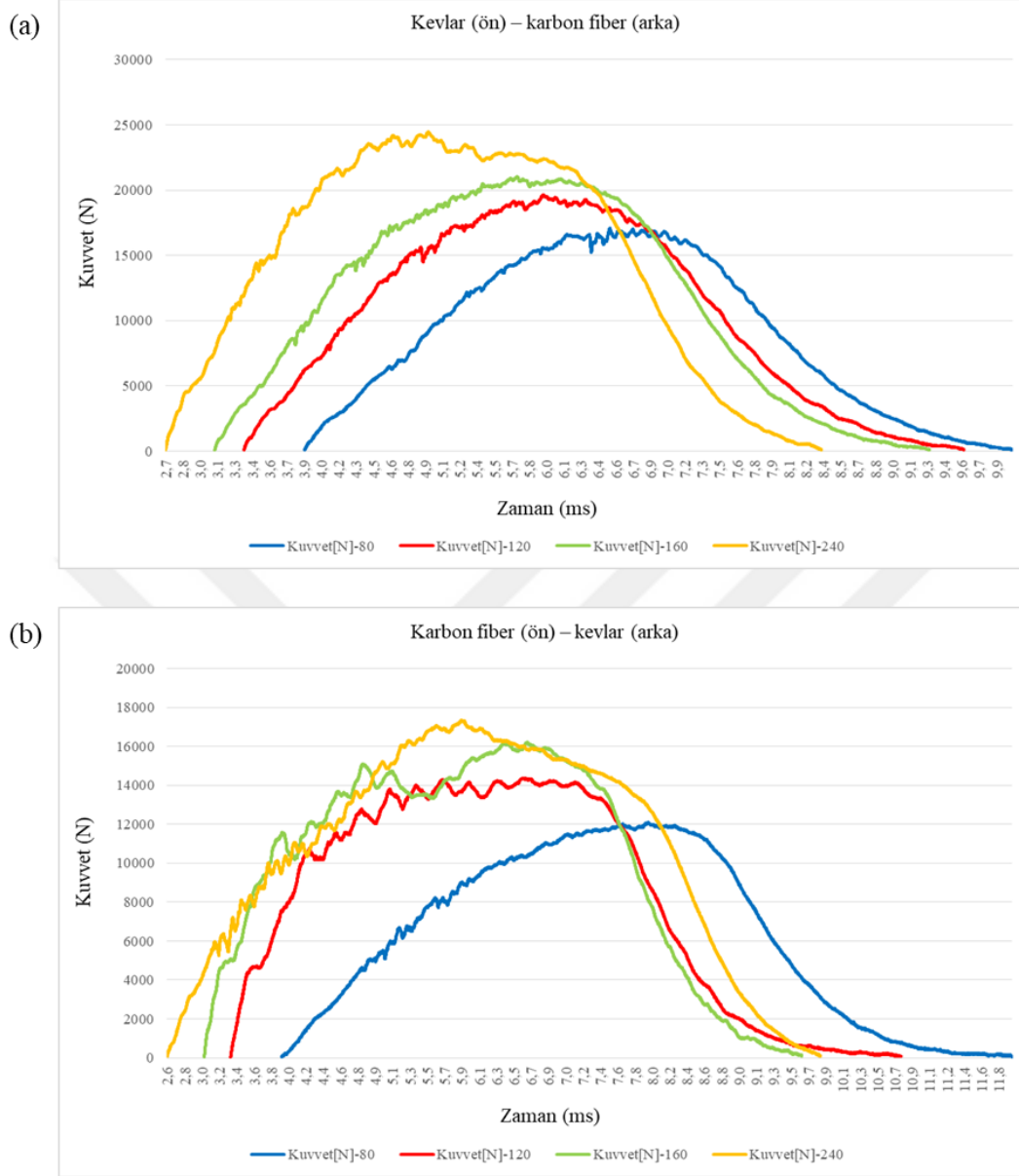
Hızlı delme testi yapılan malzemelerde üç tip senaryo oluşmaktadır. Bunlardan ilki vurucu ucun numune yüzeyine vurduktan sonra geri dönmesi (rebounding), ikincisi vurucu ucun numuneye vurduktan sonra saplanması (penetration) ve üçüncüsü ise vurucu ucun numuneye vurduktan sonra delip geçmesidir (perforation). Bu üç olay da hızlı delme testi sonrasında oluşan hasar mekanizmasını açıklamamızda bize yardımcı olur (Sayer, 2009).



Şekil 6.10. Hızlı darbe test numuneleri

Farklı enerjilerde (80J, 120J, 160J ve 240J) delme testi yapılan kompozit malzemelerin hasar mekanizması incelenerek hangi enerjilerde nasıl hasar olduğu gözlemlendi. Numunelerin yüzeyinden vurucu ucun geri sekmesi (rebounding), vurucu ucun numuneye saplanması (penetration) ve vurucu ucun numuneyi delip geçmesi (perforation) gibi üç özel durumdan hangisinin gerçekleştiği grafiklerle incelendi.

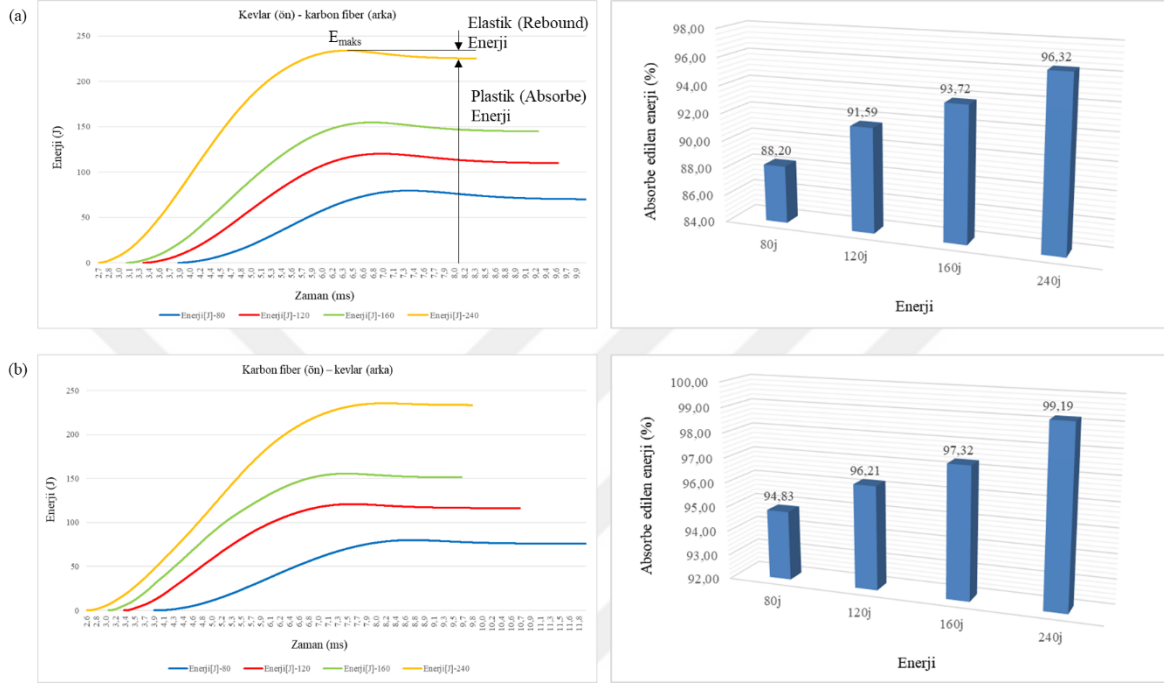
Üretilen kompozit malzemelerin farklı darbe enerjilerindeki tipik kuvvet-zaman eğrileri Şekil 6.11’de verilmiştir. Kuvvet-zaman eğrileri incelendiğinde artan darbe enerjisi ile beraber kuvvet değerinin değiştiği görüldü. En yüksek kuvvet değeri 240 J darbe enerjisinde yapılan testte kevlar (ön) - karbon fiber (arka) kompozit malzemede 24457 N olarak bulundu. En düşük kuvvet değeri ise 240 J darbe enerjisinde yapılan testte karbon fiber (ön) - kevlar (arka) malzemede 17360 N olarak bulundu. Dolayısı ile bu iki kompozit malzemeyi birbiri ile kıyasladığımızda 240 J darbe enerjisinde en yüksek kuvvet değeri kevlar (ön) - karbon fiber (arka) kompozit malzemede gerçekleşti. Kompozit malzemelerde hızlı darbe testinde uygulanan darbe enerjisine bağlı olarak matris çatlaması ve delaminasyon bölgeleri oluştu. Yapılan hızlı darbe testlerinde 240 J’e kadar kompozit malzemelerin hiçbirinin tam penetrasyona uğramadığı görüldü. Fidan ve arkadaşları yaptıkları çalışmada belirttikleri üzere, matris çatlamasının kuvvet-zaman eğrisinin eğimini değiştirdiği bilinmektedir. Kompozit malzemelerde düşük çarpma enerjilerinde matris çatlaması ağırlıklı olarak görülürken yüksek çarpma enerjilerinde delaminasyon olduğu bilinmektedir (Fidan, 2010).



Şekil 6.11. Polimer matrisli kompozit plakaların farklı darbe enerjilerindeki tipik kuvvet-zaman eğrileri

Polimer matrisli kompozit malzemelerin farklı darbe enerjilerindeki enerji-zaman grafik eğrileri Şekil 6.12’de verilmiştir. Hasar oluşum seviyesinin bilinmesi açısından enerji-zaman grafikleri kullanıldı. Genel olarak enerji-zaman grafikleri incelendiği zaman iki tip enerjinin açığa çıktığı anlaşıldı. Bunlardan ilki elastik enerji denilen (rebound enerji) hızlı darbe ucunun kompozit plakaya çarpması ile geri dönmesine sebep olan enerjidir. İkincisi ise plastik enerjiyi simgeleyen (absorbe enerji) numune tarafından sönmölen enerjiyi temsil etmektedir. Aşağıdaki grafikler incelendiğinde absorbe edilen enerjilerin çok yüksek oranlarda olduğu gözlemlendi. Ayrıca rebound enerjiler hesaplandığında vurucu ucun geri sekmesinin çok fazla miktarda olmadığı tespit edildi. Bu durum kullanılan kompozit

malzemelerin balistik arka plaka olarak kullanılabileceğinin göstergesidir. 240 J darbe enerjisinde yapılan test grafiklerini incelediğimizde absorbe edilen enerjilerin birbirine yakın olduğu tespit edilirken, en yüksek absorbe edilen enerji değerinin %99,19 ile karbon fiber (ön) - kevlar (arka) plakada olduğu belirlendi (Fidan, 2010).

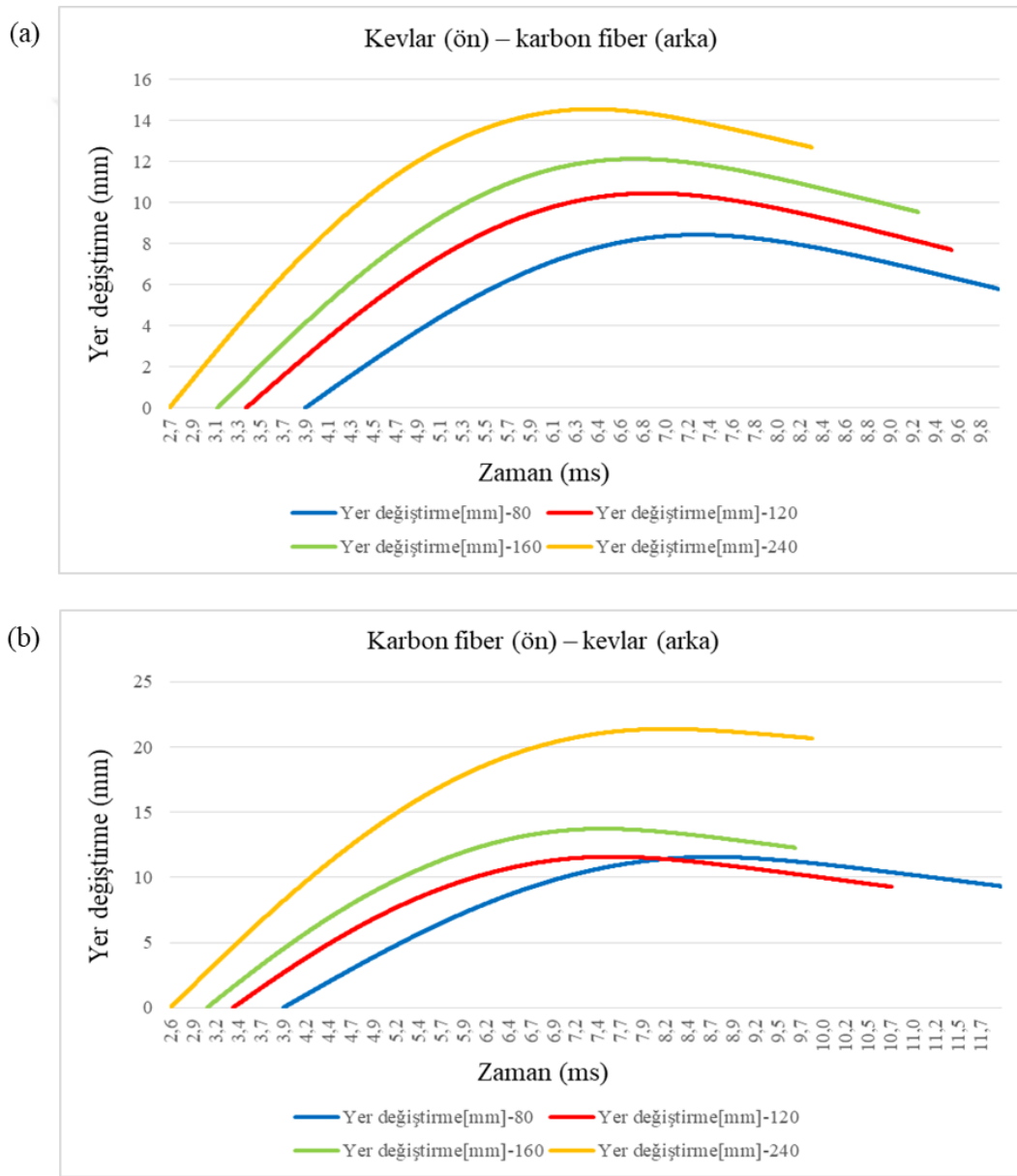


Şekil 6.12. Polimer matrisli kompozit plakaların farklı darbe enerjilerindeki tipik enerji-zaman eğrileri

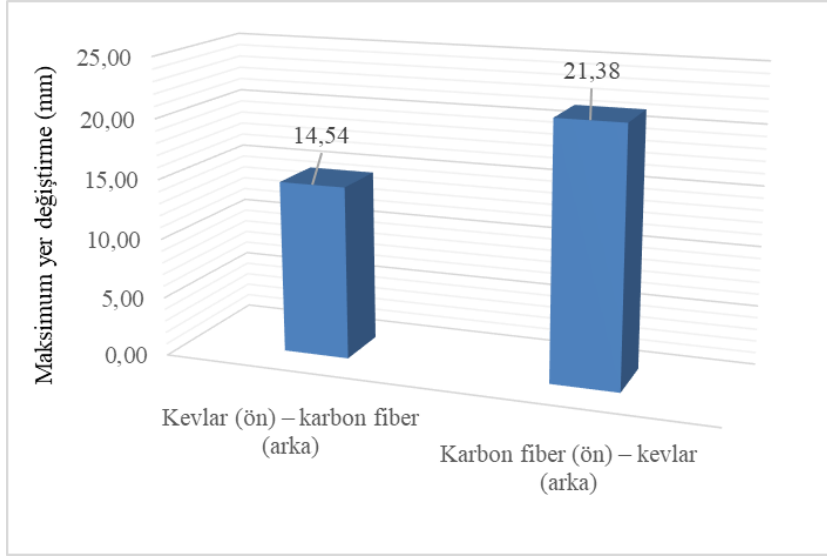
Çökme eğrisinin sürekli olarak artması hızlı delme ucunun numuneyi delip ilerlediğini gösterir. Çökme eğrisinin yukarı doğru çıkması ve belirli bir düzeyde sabit ise kalması delici ucun saplanıp kaldığının bir göstergesidir. Çökme mesafesinin önce artması ardından azalması ile meydana gelen eğri ise batıcı ucun geri sekmesi şeklinde yorumlanabilir (Sayer, 2009).

Şekil 6.13'deki yer değiştirme-zaman grafik eğrilerine bakıldığında zaman içerisinde çökme miktarının arttığı daha sonra artışın duraklayıp bir miktar azalma meydana geldiği görüldü. Grafikte yer alan eğriler incelendiğinde, batıcı ucun numune yüzeyine saplandığı ve az miktarda geri sekme olduğu durumu açıklamaktadır. Şekil 6.14'de yer alan 240 J'lük darbe enerjisinde meydana gelen maksimum çökme miktarlarına bakıldığında en büyük çökme oranının karbon fiber (ön) - kevlar (arka) plakada 21,38 mm olduğu gözlemlendi. En düşük çökme oranının ise 14,54 mm ile kevlar (ön) - karbon fiber (arka)

plakada olduğu gözlemlendi. Kevlar (ön) - karbon fiber (arka) plakaya vurucu ucun daha az batması ve daha düşük bir çökme mesafe değerine sahip olması balistik plaka olarak kullanıma daha elverişli olduğunu göstermiştir. Kevlar (ön) - karbon fiber (arka) olan durumda çökme miktarının az olması, karbon fiberin eğilme dayanımının kevlarlara göre yüksek olmasından dolayı kevlarların dayanabileceği yükün sınırına ulaşıldığında arta kalan yükün karbon fiber tarafından taşınabilmesidir. Ayrıca, karbon fiberin % uzamasının kevlarlara göre daha az olmasından ve kevlarların arka kısmında bulunmasından dolayı kevlarların uzama miktarını sınırlamış ve daha az çökme miktarı olmasına sebebiyet vermiştir.



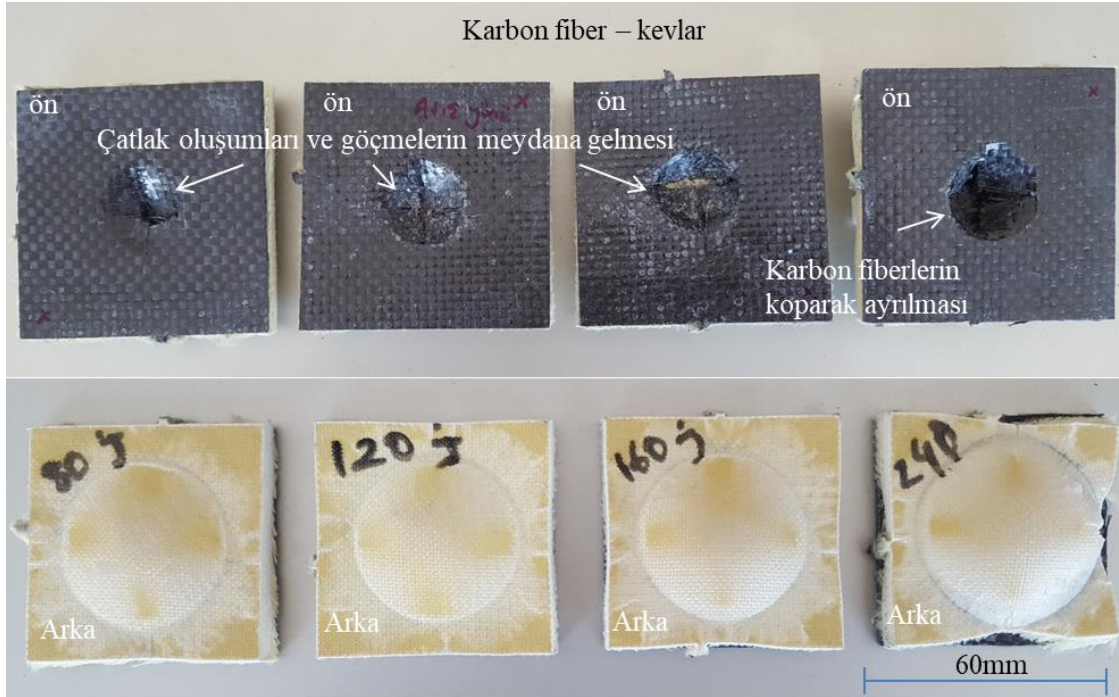
şekil 6.13. Polimer matrisli kompozit plakaların farklı darbe enerjilerindeki tipik çökme-zaman eğrileri



Şekil 6.14. Polimer matrisli kompozit plakaların 240 J darbe enerjisindeki maksimum yer değiştirme oranları

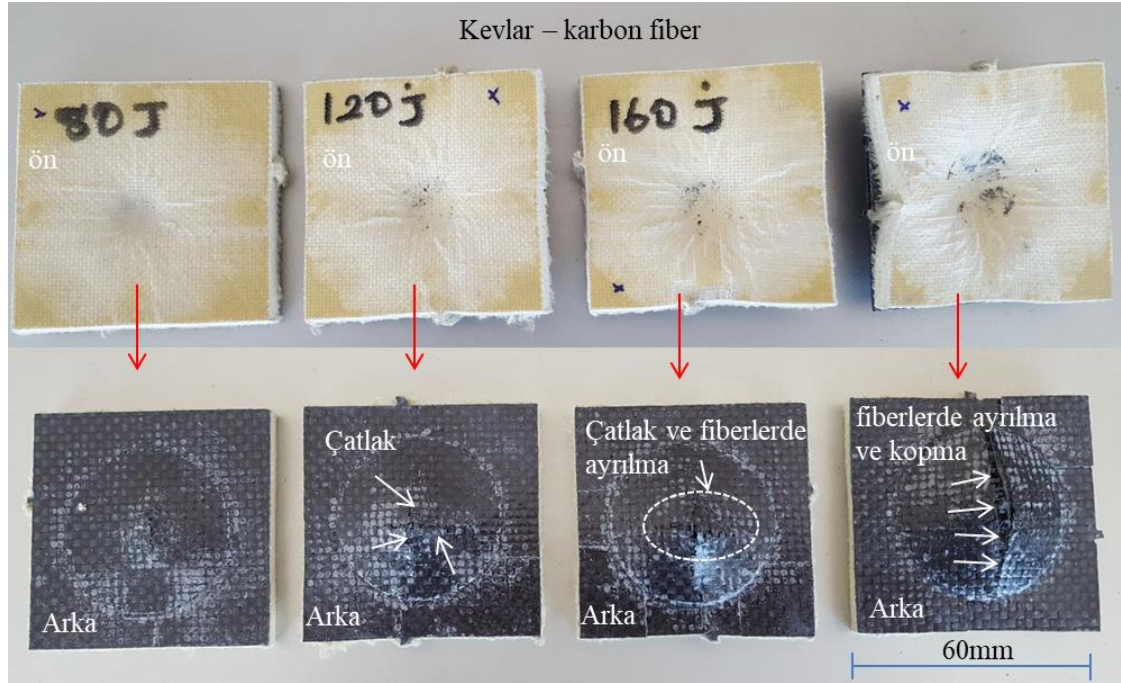
Şekil 6.15 ve 6.16’da farklı darbe enerjilerinde yapılan yüksek hızlı darbe testine maruz kalmış kompozit plakaların hasar mekanizmaları makro resim olarak verilmiştir. Kompozitlerin yukarıdaki kuvvet-zaman, enerji-zaman ve yer değiştirme-zaman grafiklerinden elde edilen veriler makro resimler ile kıyaslandı. Bunun neticesinde, kompozit plakalardan her bir enerji seviyesinde yapılan darbe testi sonrası ön ve arka taraf olmak üzere ayrı ayrı resimler alındı. Kompozit plakaların hiç birinde tam penetrasyon olmadığı gözlemlenirken, darbe enerjisinin artması ile birlikte ön kısımlarda matris çatlaması oluştuğu, arka kısımlarda ise delaminasyon ve fiber kırılmalarının olduğu gözlemlendi.

Şekil 6.15’de karbon fiber (ön) – keklar (arka) kompozit malzemelerde hızlı delme ucunun vurduğu yerde içeri doğru göçük oluştu. Göçüğe bakıldığında darbe enerjisinin artması ile birlikte çatlak ve kırılma boyutunun arttığı gözlemlendi. Arka kısımdaki keklar incelendiğinde ise herhangi bir çatlak veya kopmanın meydana gelmediği gözlemlendi.



Şekil 6.15. Karbon fiber (ön) – kevlar (arka) kompozit malzemelerin delme test sonrası makro görüntüleri

Şekil 6.16’da yer alan kevlar (ön) – karbon fiber (arka) kompozit malzemelerde tüm enerji seviyelerindeki darbe oranlarında, enerjinin artmasıyla birlikte vurucu ucun içeriye biraz daha göçtüğü ve vurucu ucun etrafındaki matris çatlakların arttığı görüldü. Arka tarafta yer alan karbon fiber kompozit malzemelerde ise darbe enerji miktarının artması ile çatlak oluştuğu ve fiber kopmalarının meydana geldiği görüldü.



Şekil 6.16. Kevlar (ön) – karbon fiber (arka) kompozit malzemelerin delme test sonrası makro görüntüleri

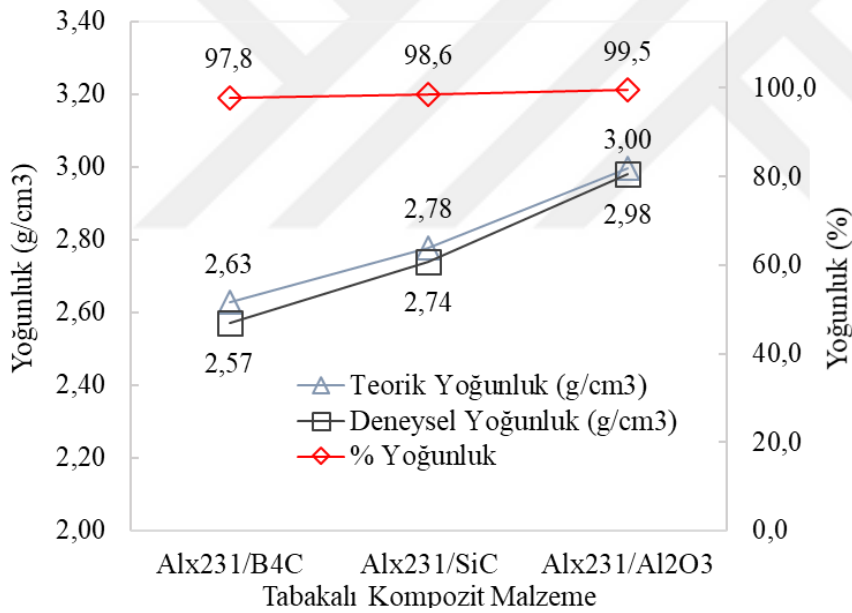
6.5. MMK Lamine Malzemelerin Yoğunluk Değişimi

Sıcak presleme yöntemi ile üretilen metal matrisli lamine kompozit malzemelerin teorik yoğunlukları karışım kuralına göre hesaplandı. Deneysel yoğunlukları ise Arşiment prensibine göre ölçüldü. Şekil 6.17’de üretilen kompozitlerin hesaplanan teorik yoğunlukları, deneysel yoğunlukları ve % yoğunlukları grafiksel olarak gösterilmiştir. Hesaplanan teorik yoğunluklara bakıldığında en yüksek teorik yoğunluk $\text{Alx231/Alx231}+\%50\text{Al}_2\text{O}_3$ kompozit malzemesinde ($3,00 \text{ g/cm}^3$) çıktı. Daha sonra sırası ile $\text{Alx23/Alx231}+\%50\text{SiC}$ ve $\text{Alx231/Alx231}+\%50\text{B}_4\text{C}$ kompozit malzemelerinde $2,78$ ve $2,63 \text{ g/cm}^3$ olarak hesaplandı. Deneysel yoğunluklara bakıldığında ise her üç lamine kompozit malzeme için de yoğunluğun oldukça yüksek olduğu görüldü. Teorik ve deneysel yoğunluklardan hesaplanan % yoğunluğa bakıldığında ise en yüksek yoğunluk $\%99,5$ ile $\text{Alx23/Alx231}+\%50\text{Al}_2\text{O}_3$ kompozit malzemedede görüldü. $\text{Alx231/Alx231}+\%50\text{SiC}$ kompozit malzemesinde $\%98,6$, $\text{Alx231/Alx231}+\%50\text{B}_4\text{C}$ kompozit malzemesinde ise $\%97,8$ olduğu görüldü.

Göde yapmış olduğu benzer bir çalışmada Alumix 123 içerisine $\%10$ oranında B_4C ve SiC parçacık ilavesi yapmıştır. Üretilen kompozitlerin görünür yoğunlukları incelendiğinde SiC

parçacık ilaveli kompozitlerin yoğunluğunun B_4C parçacık ilaveli kompozit malzemelere göre daha yüksek olduğu anlaşılmıştır. Yoğunluklar sırası ile SiC ve B_4C parçacık ilaveli kompozitlerde %98,5 - %97,6 olarak bulunmuştur. Yapılan çalışmada bulunan yoğunluk değerleri literatürle benzer bir şekildedir (Göde, 2013).

Al_2O_3 parçacık takviyeli lamine kompozitlerde ise yoğunluk %99,5 oranında çıkmıştır. Al_2O_3 parçacık takviyeli kompozitte yoğunluğun artmasının nedeni Alumix231 matris alaşımı ile Al_2O_3 parçacıklarının arasında boşlukların meydana gelmemesinden kaynaklanmaktadır. Vencil ve arkadaşları yapmış oldukları benzer bir çalışmada mikroyapı resimlerinin sonucuna bakarak A356 alaşım matrisi ile Al_2O_3 parçacıkları arasında iyi bir mekanik bağ oluştuğunu görmüşlerdir. Bu durumu yoğunluğun artmasında önemli bir etken olarak görmüşlerdir (Vencil, 2010).



Şekil 6.17. Üretilen kompozit malzemelerin yoğunluk grafikleri

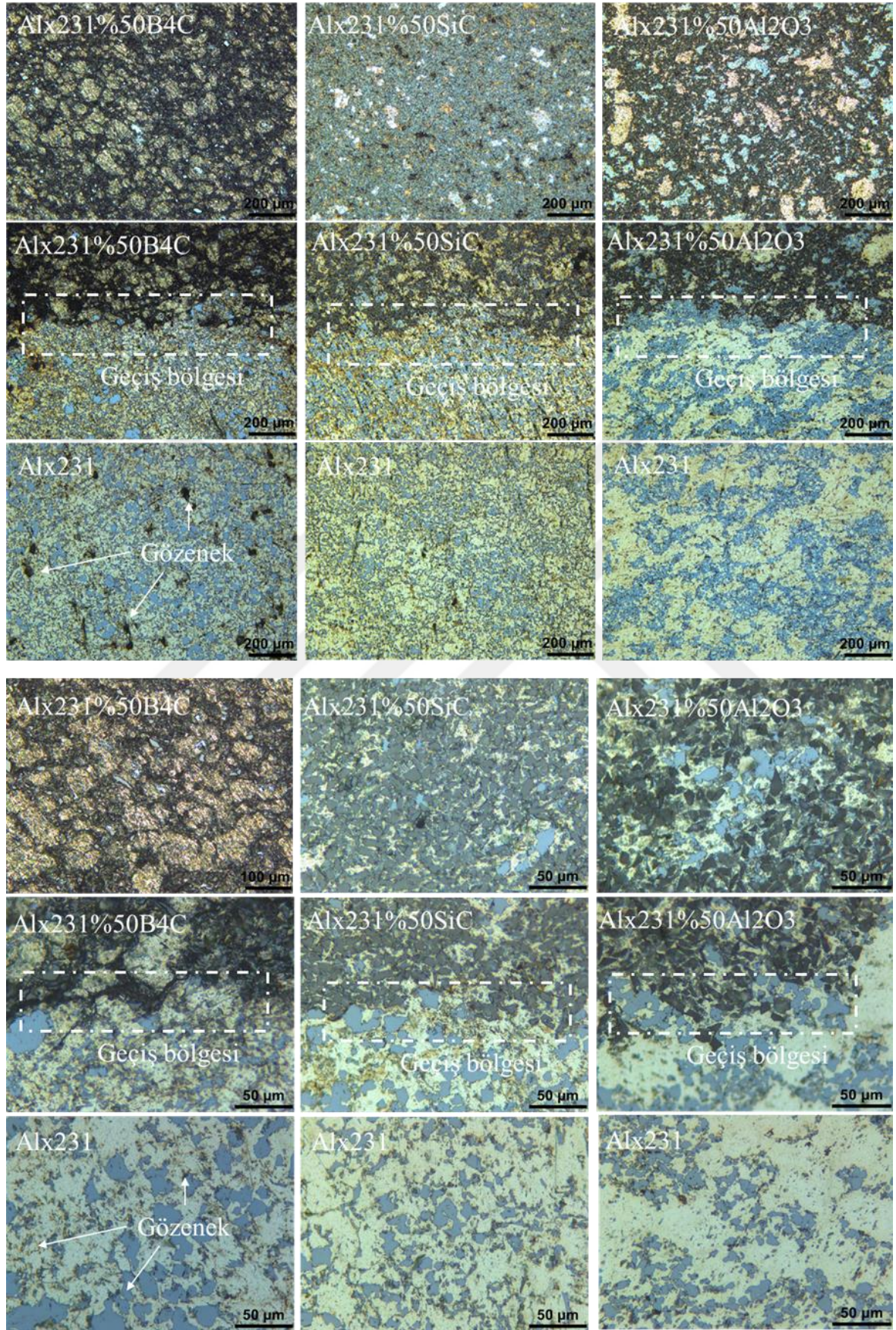
6.6. MMK Lamine Malzemelerin Optik Mikroskop Analizleri

Sıcak presleme yöntemi ile üretilen metal matrisli lamine kompozit malzemelerden mikroyapı analizleri için numuneler alındı ve mikroyapı karakterizasyonu için üç farklı numune elde edildi. Bunlardan ilki Alumix231/Alumix231+%50 B_4C , ikincisi Alumix231/Alumix231+%50SiC ve üçüncüsü ise Alumix231/Alumix231+%50 Al_2O_3 kompozit malzemesidir. Lamine olarak iki katman halinde üretilen kompozit malzemelerin

takviyesiz olan alüminyum alaşımlı tarafından, ara geçiş yüzeyinden ve seramik parçacık takviyeli tarafından olmak üzere farklı büyütme oranlarında mikroyapı görüntüleri alındı (Şekil 6.18.).

Şekil 6.18’de bulunan kompozit malzemelerin mikroyapı görüntülerini incelediğimizde B_4C parçacık takviyeli lamine kompozit levhalarda, B_4C parçacık takviyeli tarafta gözenek oluşumları meydana geldi. Bu durum B_4C parçacık takviyeli lamine kompozit malzemelerin yoğunluğunda düşüş meydana getirdi (Şekil 6.17). Baradeswaran ve arkadaşları yapmış oldukları çalışmada da benzer şekilde Al matrisli B_4C parçacık takviyeli kompozit malzemelerde ıslatılabilirlik problemi görmüşlerdir. Bu ıslatılabilirlik probleminden dolayı Al fazı ile B_4C fazı arasında iyi bir ara yüzey bağı meydana gelememiş ve takviye elemanı ile matris fazı arasında boşlukların oluştuğunu gözlemlemişlerdir. Dolayısı ile yapılan çalışmada da bu ıslatılabilirlik probleminden dolayı B_4C parçacıkları ile Alumix231 fazı arasında boşlukların oluştuğu görülmüştür (Baradeswaran, 2013).

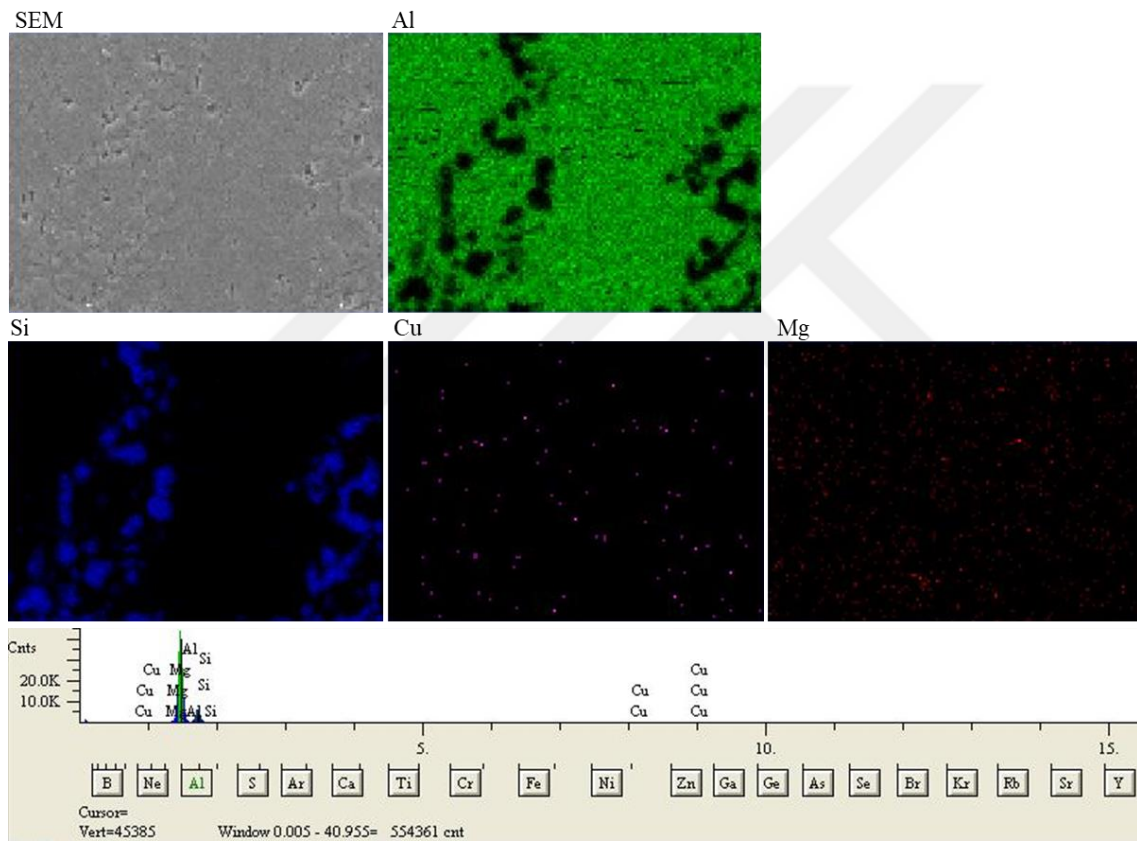
SiC parçacık takviyeli lamine kompozit malzemelerde ise alüminyum matris ile SiC parçacıkları arasında gözeneklerin neredeyse oluşmadığı görüldü (Şekil 6.18). Al_2O_3 parçacık takviyeli lamine kompozit malzemelerde SiC parçacık takviyeli kompozitlerde olduğu gibi herhangi bir gözenek oluşmadığı görüldü. Al_2O_3 ve SiC parçacık takviyeli lamine kompozit malzemelerde takviye elemanları matris yapı içerisinde homojen bir dağılım sergilerken B_4C parçacık takviyeli lamine kompozit malzemelerde küçük oranlarda topaklanma oluştuğu gözlemlendi. Şekil 6.18’de yer alan mikroyapı görüntülerine bakıldığında B_4C parçacıklarının Alumix231 parçacıkları arasında biriktiği görüldü. Ayrıca ağırlıkça eşit oranda (%50) seramik parçacık katılmasına rağmen B_4C parçacık takviyeli kompozit malzemelerin mikroyapı görüntülerinde azaldığı anlaşıldı. Bu durumun, mikroyapı hazırlık esnasında zımparalama yapılırken ana faz ile iyi bir bağlanma gerçekleştirilmeyen B_4C parçacıklarının yüzeyden ayrılmasından kaynaklandığı düşünülmüştür.



Şekil 6.18. Sıcak presleme sonrası elde edilen lamine kompozit malzemelerin x100 ve x500 büyütme ile çekilen mikroyapı görüntüleri

6.7. MMK Lamine Malzemelerin SEM ve EDS Analizleri

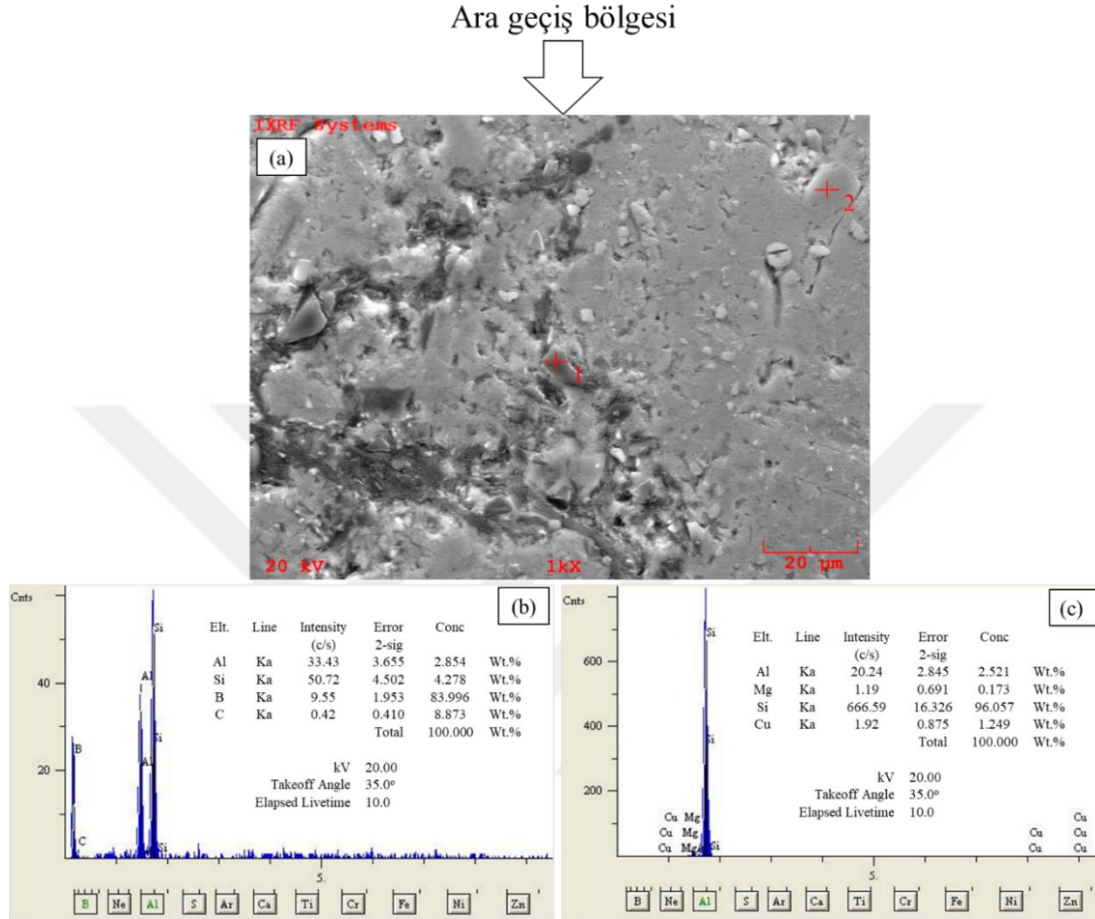
Şekil 6.19'da Alumix231/Alumix231+%50SiC lamine kompozit malzemenin Alumix231 tarafından alınan EDS element haritalama analizi görüntüleri verilmiştir. Haritalama görüntüleri ile alüminyum alaşımı içerisinde yer alan alaşım elementlerinin (Si, Cu, Mg) nasıl bir dağılım sergilediği görülmüştür. Cu ve Mg fazının matris yapı içerisinde homojen bir dağılım sergilediği gözlemlendi ve mavi renkli silisyum fazının tane sınırlarına doğru gelerek bir arada kaldığı anlaşıldı.



Şekil 6.19. Sıcak presleme sonrası Alumix231 malzeme yüzeyinden alınan haritalama görüntüsü

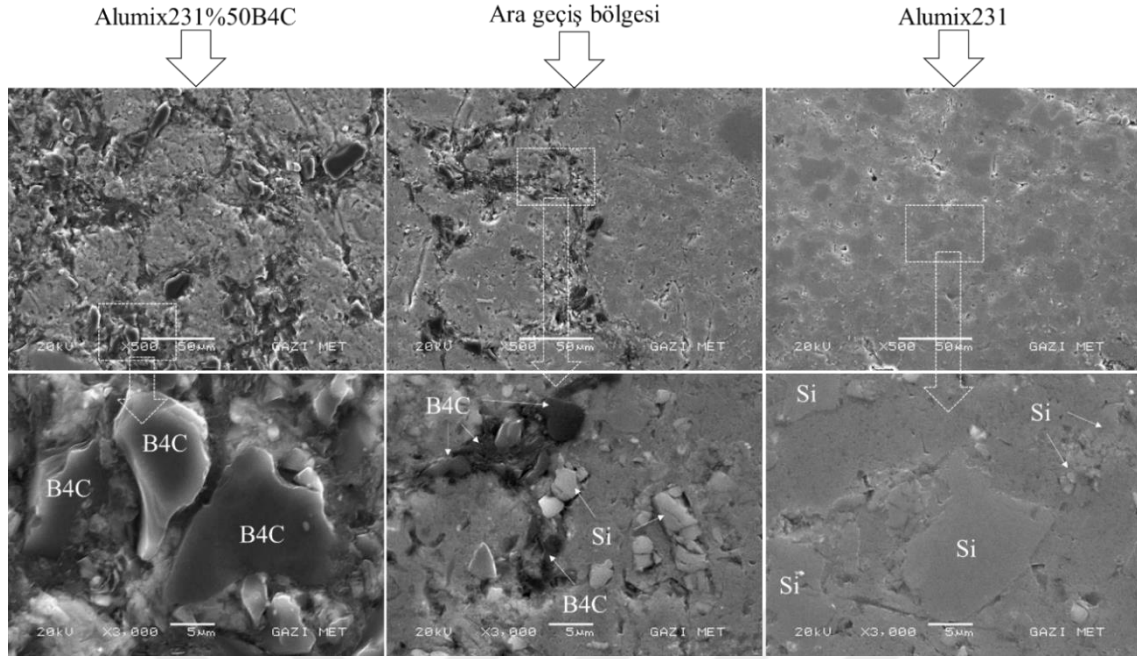
Şekil 6.20'de Alumix231/Alumix231+%50B₄C lamine kompozit malzemenin ara geçiş bölgesinden alınan SEM resmi ve EDS sonuçları verilmiştir. Seramik parçacık takviyeli tarafa baktığımızda B₄C parçacıklarının tane sınırlarında olduğu ve etraflarının boş kaldığı gözlemlendi. Koyu gri renkte olan B₄C parçacıkları gözenekli bir yapı meydana getirmiş ve ara geçiş bölgesinde de görülen B₄C parçacıkları bir hat boyunca dizilmiştir. Ayrıca Alumix231 tarafına baktığımızda açık gri renkte olan Si elementlerinin varlığı

tespit edildi. Yapılan EDS analizleri neticesinde koyu gri renkte olan parçacıkların B_4C ve açık gri renkte olan yerlerin ise Si elementi olduğu anlaşıldı.



Şekil 6.20. Aluminix231/Aluminix231+%50 B_4C lamine kompozit malzemenin (a) SEM resmi ve EDS analizi alınan bölgeler, (b) 1. bölgenin, (c) 2. bölgenin EDS analizi

Şekil 6.21’de yer alan görüntüleri incelediğimizde B_4C parçacık takviye edilmiş tarafta düzgün olmayan bir yüzey olduğu görüldü. Bu durumun, alüminyum alaşımı ile çok iyi bir bağ kuramayan B_4C parçacıklarının metalografik incelemeler öncesinde zımparalama yapılırken matris yapıdan ayrılarak uzaklaşmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Ağırlıkça B_4C parçacık oranı çok fazla olduğundan (%50) Aluminix231 matris içerisinde çok iyi bir tutunabilirlik sergilemediği düşünülmektedir ve B_4C parçacıklarının etrafında boşluklar olduğu görülmüştür. Alüminyum alaşımı ile B_4C parçacıklarının ara yüzeyinde ıslatılabilirlik problemi olduğu yapılan araştırmalarda anlaşılmıştır. Bu çalışmada ağırlıkça yüksek oranda (%50) B_4C parçacık eklenmesiyle yapılan çalışmalarla benzer sonuçlar elde edilmiş ve Al alaşımı ile B_4C parçacıklarının arasında boşluklar artmıştır (Toptan, 2006; Lee, 2001).

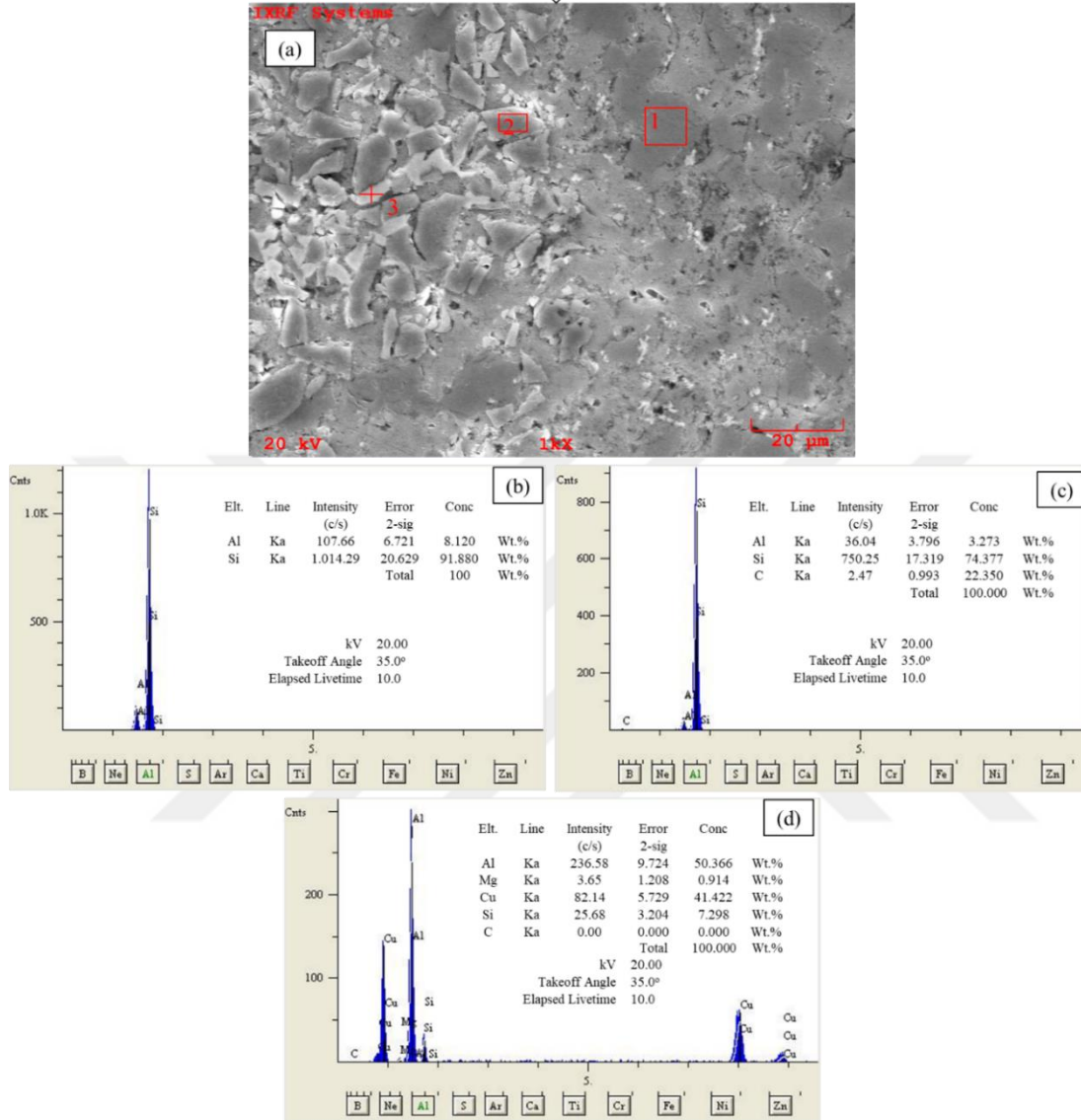


Şekil 6.21. Alumix231/Alumix231+%50B₄C lamine kompozit malzemenin seramik parçacık takviyeli, ara geçiş ve takviyesiz tarafından alınan SEM resimleri

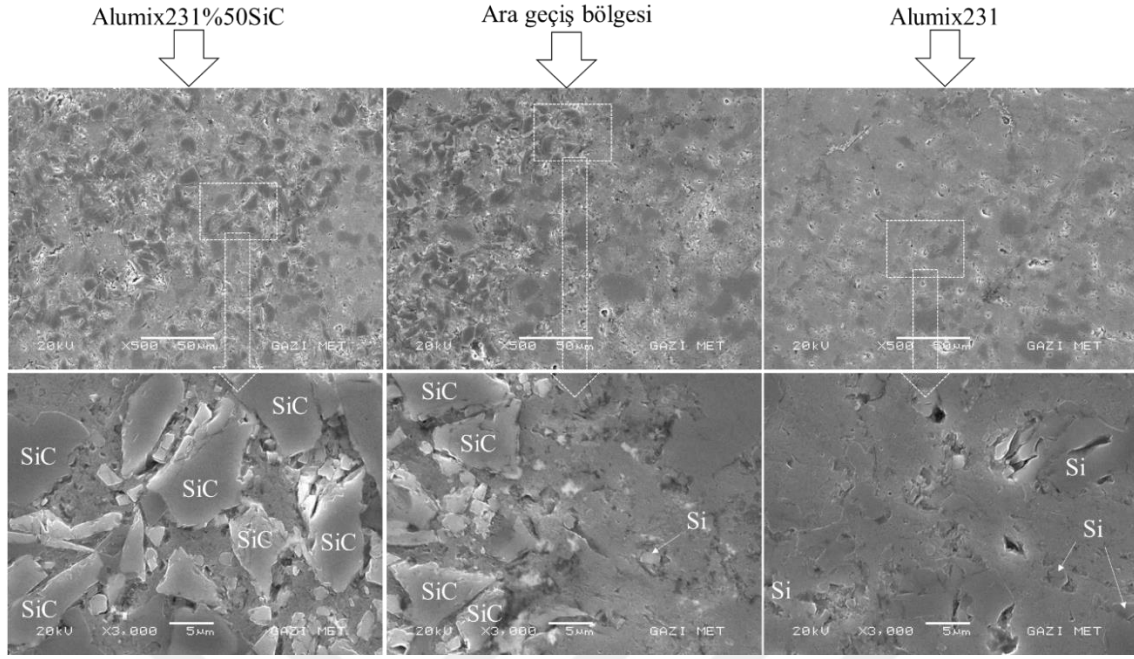
Şekil 6.22’de yer alan Alumix231/Alumix231+%50SiC lamine kompozit malzemenin ara geçiş bölgesinden alınan SEM resmi ve EDS sonuçları görölmektedir. Alumix231 alaşım tarafından alınan EDS sonucuna göre 1 numaralı bölgede Si parçacığının olduğu, ara geçiş bölgesinden alınan 2 numaralı bölgede ise SiC parçacığının olduğu anlaşıldı.

Şekil 6.23’de yer alan SEM resimlerini incelediğimizde ise SiC parçacıklarının matris yapı içerisinde homojen bir dağılım sergilediği göröldü. Ayrıca SiC parçacıklar matris yapı içerisinde gömölü olarak kaldığından metalografik incelemeler için yapılan zımparalama ile matris yapıdan ayrılmadığı anlaşıldı. Karışım tozlar yüksek sıcaklıklarda ve yüksek basınçta preslendiklerinden dolayı, çoğunluklu olarak SiC parçacıklar Al alaşımı içerisinde gömöldü. Islatma probleminden dolayı bazı yerlerde SiC parçacıkların etrafında boşluklar oluştu. Ayrıca SiC parçacıkların etrafında alüminyum bakır bileşiklerinin oluştuğu göröldü.

Ara geçiş bölgesi



Şekil 6.22. Alumix231/Alumix231+%50SiC lamine kompozit malzemenin (a) SEM resmi ve EDS analizi alınan bölgeler, (b) 1. bölgenin, (c) 2. Bölgenin, (d) 3. bölgenin EDS analizi

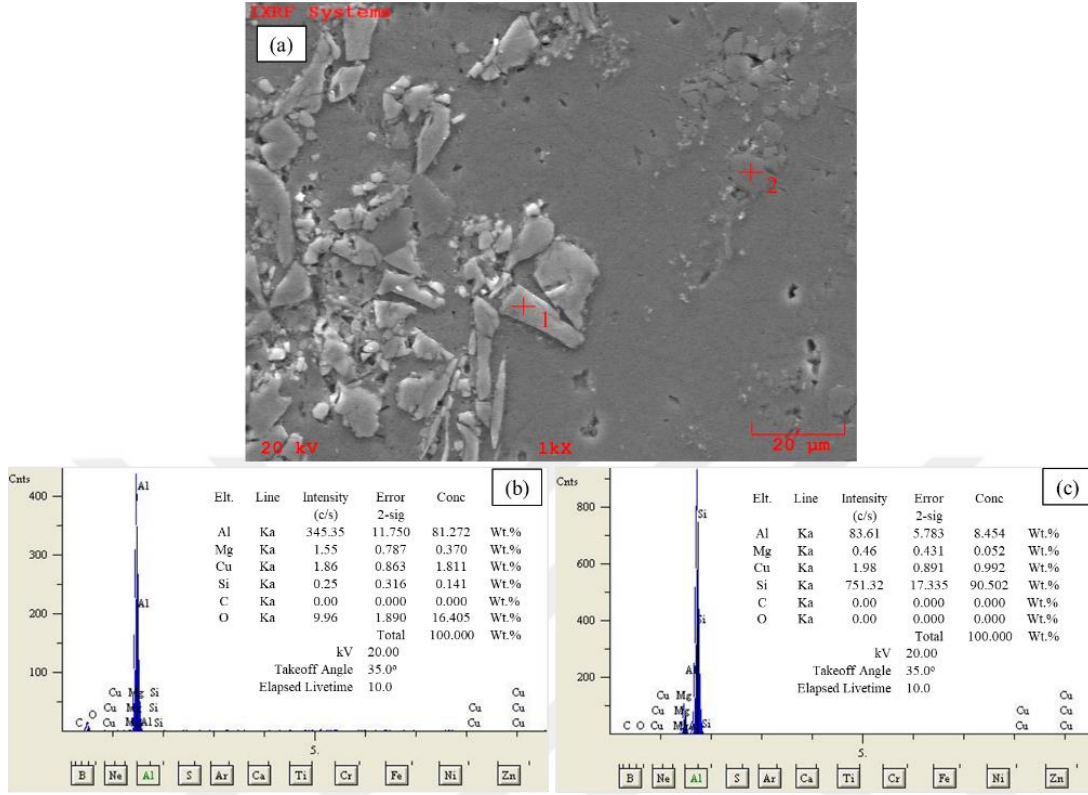


Şekil 6.23. Alumix231/Alumix231+%50SiC lamine kompozit malzemenin seramik parçacık takviyeli, ara geçiş ve takviyesiz tarafından alınan SEM resimleri

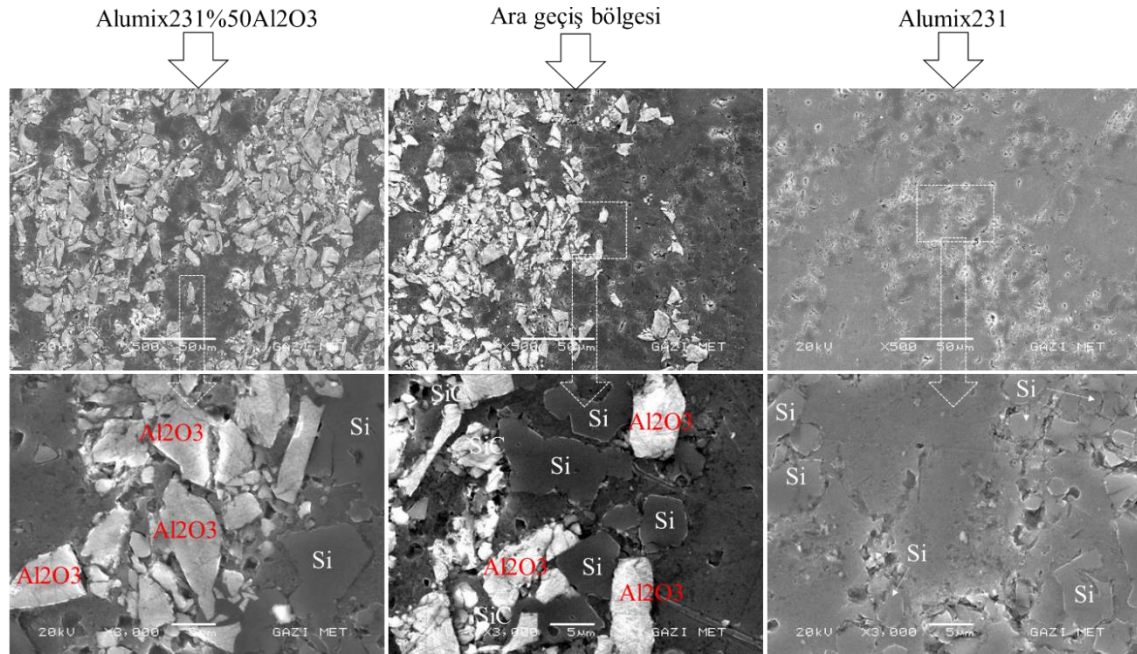
Şekil 6.24’de Alumix231/Alumix231+%50Al₂O₃ lamine kompozit malzemenin ara geçiş bölgesinden alınan SEM resimleri ve EDS analiz sonuçları verilmiştir. Yapılan çalışmada toz metalurjisi tekniği kullanılarak yüksek sıcaklığın etkisi ile Al₂O₃ tozları matris ile tamamen çevrelenmiştir. Bazı bölgelerde ise mikro gözeneklere rastlanmıştır. Yapılan EDS sonuçlarına göre oksijen ve alüminyum element oranının yüksek çıktığı 1 numaralı bölgede Al₂O₃ parçacıklarının olduğu, Si oranının yüksek çıktığı 2 numaralı bölgede ise Si parçacıklarının olduğu görülmektedir.

Şekil 6.25’de yer alan SEM resimlerine baktığımızda seramik parçacık takviyeli tarafta Al₂O₃ parçacıklarının oldukça fazla miktarda olduğu görüldü. Ayrıca ara geçiş bölgesinde, Al₂O₃ parçacıkları ile Si parçacıklarının iç içe geçtiği görüldü. Sıcak presleme esnasında yüksek presleme basıncından dolayı bazı Al₂O₃ parçacıklarında çatlak oluşumlarının ve kırılmaların meydana geldiği gözlemlendi.

Ara geçiş bölgesi



Şekil 6.24. Alumix231/Alumix231+%50Al₂O₃ lamine kompozit malzemenin (a) SEM resmi ve EDS analizi alınan bölgeler, (b) 1. bölgenin, (c) 2. bölgenin EDS analizi



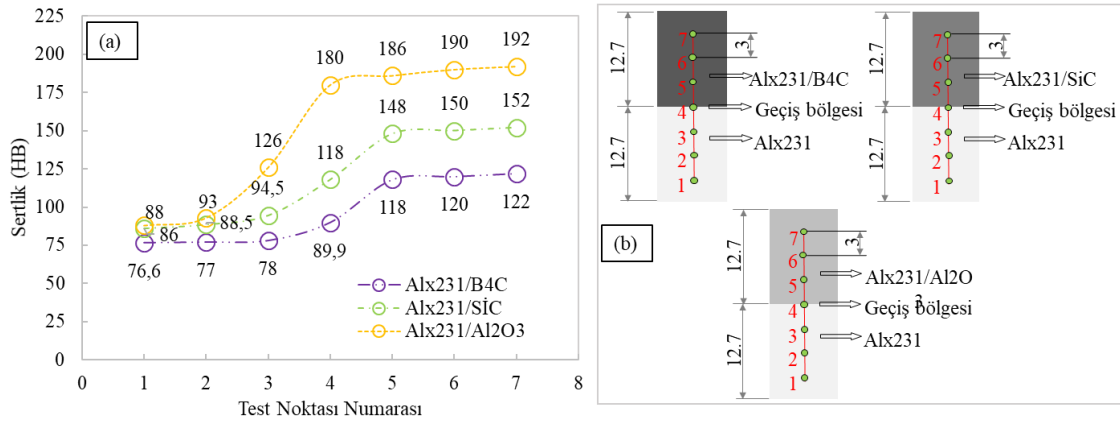
Şekil 6.25. Alumix231/Alumix231+%50Al₂O₃ lamine kompozit malzemenin seramik paracak takviyeli, ara geçiş ve takviyesiz tarafından alınan SEM resimleri

6.8. MMK Lamine Malzemelerin Sertlik Değişimi

Üretilen lamine kompozit malzemelerin kesit yönünde (25,4 mm olan yerden) eşit aralıklarla (3 mm) toplam 7 adet sertlik değeri alındı. Sertlik değerleri en az 3 farklı kesitten alınmış olup ortalama değerleri hesaplandı. Sertlik değerleri alınırken Alumix231 tarafından 1 numara ile başlanarak kompozit malzeme tarafına doğru 7 numara ile bitirildi. 4 numaralı sertlik yeri ise geçiş bölgesinin olduğu yerdir.

Bu çalışmada üretilen lamine kompozit malzemelerin takviyesiz tarafından seramik parçacık takviyeli tarafına gelindikçe sertliklerde artış olduğu görüldü. Sertlik artışlarına bakıldığında, geçiş bölgesinde bir sertlik artışı olduğu gözlemlendi. Takviye elemanlarının varlığı sertlik artışına neden olmuştur (Şekil 6.26). Toz metalurjisi ile üretilen kompozit malzemelerde gözeneklerin varlığı da sertlik oluşumunu negatif olarak etkilemektedir. Mazahery ve arkadaşları, Mondal ve arkadaşları çalışmalarında benzer şekilde mikron boyutundaki sert kırılğan olan takviye elemanlarının dislokasyon hareketini engellediğinden Al alaşımlarının sertliklerini arttırdığını görmüşlerdir. Islam ve Ark. yaptıkları benzer bir çalışmada TM yöntemi ile üretmiş oldukları malzemelerde gözeneklilik oranının artması ile sertlik değerlerinin azaldığını görmüşlerdir (Mazahery, 2012, Mondal, 2006; Islam, 2011).

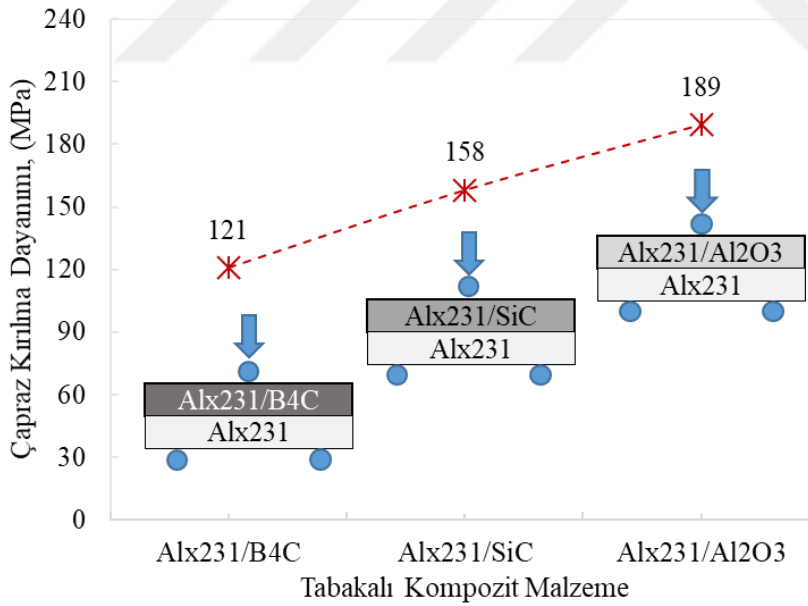
Şekil 6.26'daki grafik incelendiğinde en yüksek sertlik değerleri Alumix231/Alumix231+%50Al₂O₃ kompozit malzemesinde olduğu görüldü. Daha sonra ikinci sert malzeme Alumix231/Alumix231+%50SiC olurken en düşük sertlikte olan malzeme Alumix231/Alumix231+%50B₄C olduğu görüldü. Sertlikteki bu değişimler gözenek oluşumu ile ilgili olduğundan en çok gözenek olan B₄C parçacık takviyeli kompozitte sertlik daha düşük çıkarken gözenek oranı en düşük olan Al₂O₃ parçacık takviyeli kompozitlerde sertlik daha yüksek çıkmıştır.



Şekil 6.26. Üretilen kompozit malzemelerin sertlik değişim grafikleri

6.9. MMK Lamine Malzemelerin Çapraz Kırılma Dayanımları

Şekil 6.27’de numunelerin çapraz kırılma dayanım grafiği verilmiştir. Her bir malzeme cinsinden hazırlanan üçer adet test numunesinin test sonrası elde edilen değerlerinin ortalaması alınarak grafik oluşturuldu.



Şekil 6.27. Üretilen kompozit malzemelerin çapraz kırılma dayanım grafiği

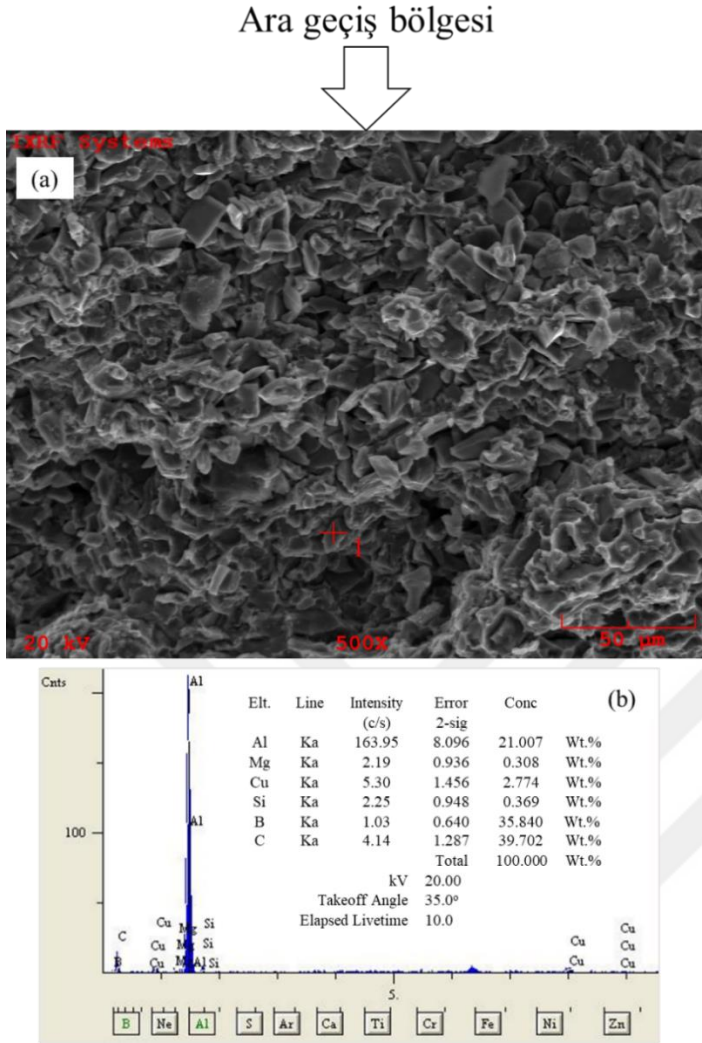
Çapraz kırılma dayanım grafiği incelendiğinde en yüksek çapraz kırılma dayanımı Alumix231+%50Al₂O₃ kompozit malzemelerde 189 MPa olarak bulundu. En düşük çapraz kırılma dayanımı ise Alumix231+%50B₄C kompozit malzemelerde 121 MPa olarak bulundu. Alumix231+%50SiC kompozitlerde ise dayanım 158 MPa olarak gözlemlendi.

Üretilen kompozit malzemelerin mikroyapı resimlerinde ve yoğunluk hesaplamalarında gözeneklerin oluştuğu görüldü. Sertliğin değişmesinde önemli bir etken olan gözeneklerin malzemenin mukavemetini de düşürdüğü düşünülmektedir. Çapraz kırılma dayanımlarında gözenek oranı en düşük ve sertlik değerleri en yüksek olan Al_2O_3 parçacık takviyeli kompozit malzemelerin çapraz kırılma dayanım değerleri yüksek çıkmıştır. Sertliği düşük olan B_4C parçacık takviyeli kompozit malzemelerde ise matris ile takviye elemanları arasında boşluk oluştuğu görülmüş ve oluşan bu boşluklar yük altında mikro çatlak oluşumunu tetiklediğinden dolayı B_4C parçacık takviyeli kompozitlerde çapraz kırılma dayanımı daha düşük çıkmıştır.

6.10. MMK Lamine Malzemelerin Kırık Yüzeylerin Analizi

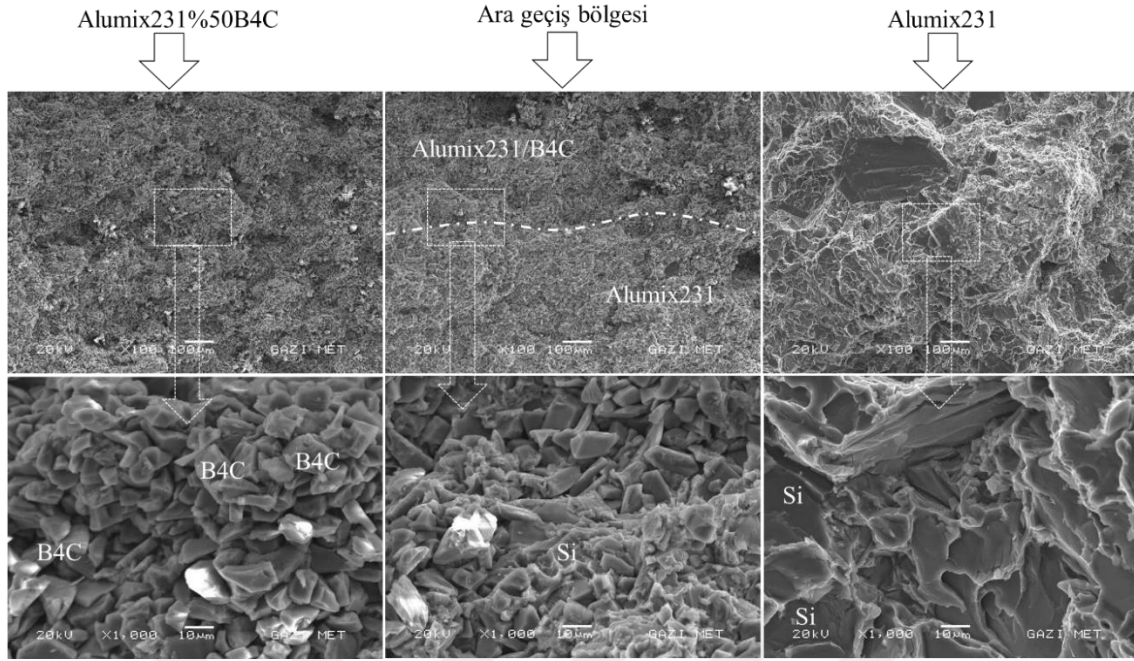
Metal matrisli lamine kompozit malzemelerin çapraz kırılma test sonrası kırık yüzeylerinden 90° dik olarak SEM resimleri alındı ve EDS sonuçlarına bakıldı. Her üç tip kompozit malzemenin seramik parçacık takviyeli, ara geçiş bölgesi ve matris bölgesi olmak üzere üç bölgesinden de SEM resimleri alındı (Şekil 6.29, Şekil 6.31, Şekil 6.33).

Şekil 6.28’de Alumix231/Alumix231+%50 B_4C lamine kompozit malzemenin kopma sonrası ara geçiş bölgesinden alınan SEM resmi verilmiştir. 1 numaralı koyu renkte duran parçacıktan alınan EDS sonucuna göre bu parçacıkların B_4C parçacık olduğu anlaşıldı. Kompozit malzemenin kırık yüzeyinde olan B_4C parçacıkların havada askıda kaldığı görüldü. Ayrıca B_4C parçacıkların etrafında herhangi bir matrisin olmadığı ve bu durum kırılmanın B_4C parçacıklarının yoğun olduğu yerden gerçekleştiği düşünülmektedir.



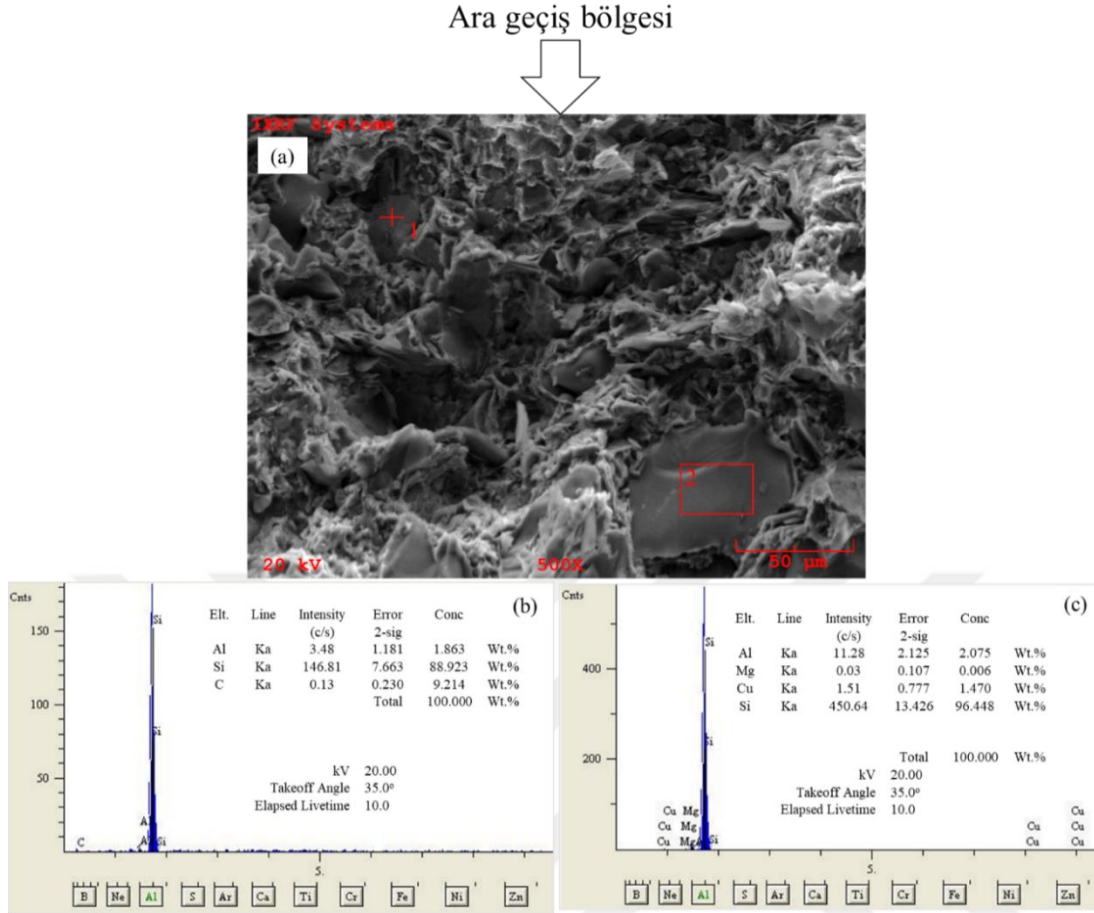
Şekil 6.28. Çapraz kırılma test sonrası Alumix231/Alumix231+%50B₄C kompozit malzemenin ara geçiş bölgesinden alınan (a) SEM resmi (b) 1 numaralı bölgenin EDS sonucu

Şekil 6.29’da yer alan Alumix231/Alumix231+%50B₄C lamine kompozit malzemelerin kırık yüzey görünümlerine baktığımızda, iç içe duran B₄C parçacıklarının matris yapı tarafından neredeyse hiç ıslanmadığı görüldü. Dolayısı ile kopmanın bu bölgede gevrek olduğu söylenebilir. Ara geçiş bölgesinde ise Alumix231 tarafına doğru gidildikçe bağlanmanın ve bir araya gelmenin olduğu görüldü. Alumix231 tarafına gittiğimizde ise kopan yüzeyde küçük gözlerin oluştuğu ve Si alaşım elementinin matris içine gömüldüğü gözlemlendi. Alumix231 tarafında ise kırılmanın B₄C parçacık tarafına göre daha sünek olduğu gözlemlendi.



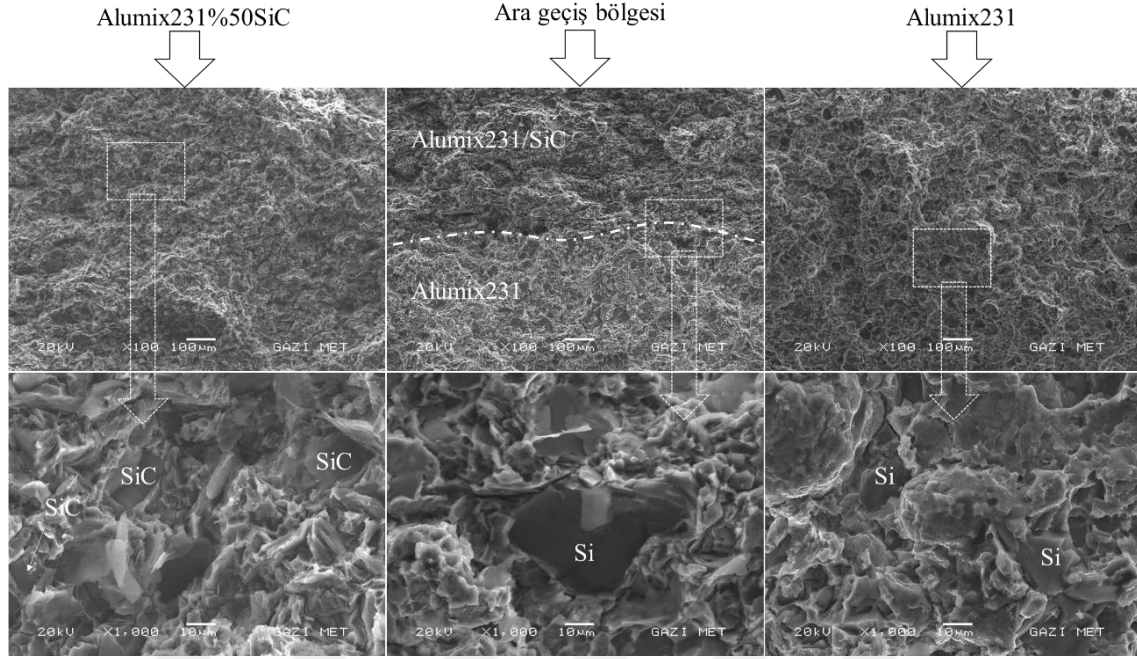
Şekil 6.29. Çapraz kırılma test sonrası Alumix231/Alumix231+%50B₄C kompozit malzemenin kırık yüzeyinden alınan SEM resimleri

Şekil 6.30'da Alumix231/Alumix231+%50SiC lamine kompozit malzemelerin kırık yüzeyinden alınan ara geçiş bölgesinin SEM ve EDS görüntüleri verilmiştir. Matris yapı içerisine gömülü olan 1 numaralı parçacıktan alınan EDS sonucuna göre bu parçanın SiC seramik takviyesi olduğu, 2 numaralı gömülü duran parçacığın ise Si elementi olduğu belirlendi.



Şekil 6.30. Çapraz kırılma test sonrası Alumix231/Alumix231+%50SiC kompozit malzemenin ara geçiş bölgesinden alınan (a) SEM resmi (b) 1 numaralı bölgenin (c) 2 numaralı bölgenin EDS sonucu

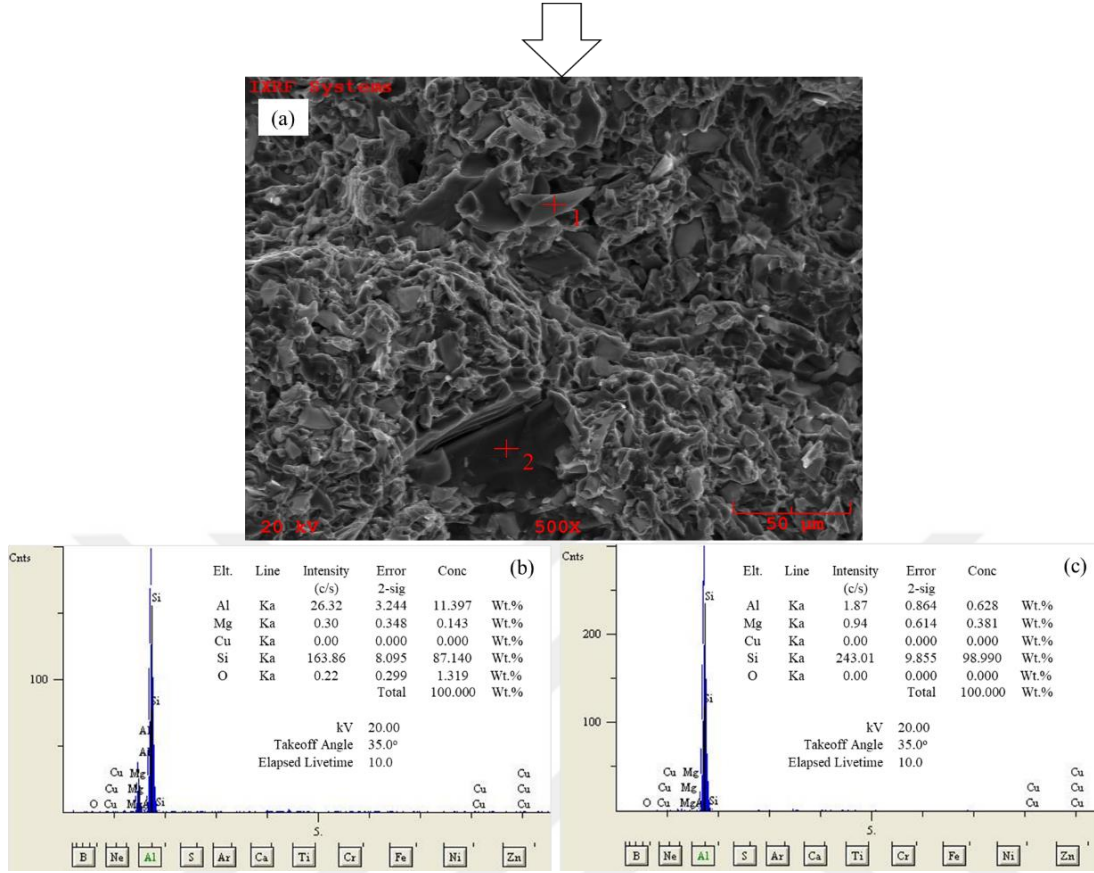
SiC parçacık takviyeli kompozit malzemelerde kopan yüzeyin SEM resmine baktığımızda gözenek veya çukurcukların oluştuğu gözlemlendi. Bu durumda, B₄C parçacık takviyeli kompozitlere göre kırılmanın daha sünek şekilde gerçekleştiği söylenebilir (Şekil 6.31). SiC parçacık takviyeli kısımdan alınan SEM resimlerini incelediğimizde SiC parçacıklarının matris yapı içerisinde gömülü kaldığı görüldü. Bu durum SiC ile matris yapının B₄C parçacığına göre daha uyumlu olduğunun göstergesidir. Ara geçiş bölgesinde Si parçacıkların da matris yapı içerisinde gömülü kaldığı görüldü. Alumix231 alaşım tarafında ise küçük küçük gözeneklerin oluşması SiC parçacık takviyeli tarafa göre daha sünek bir kırılma yüzeyi oluşturduğunu söylemektedir.



Şekil 6.31. Çapraz kırılma test sonrası Alumix231/Alumix231+%50SiC kompozit malzemenin kırık yüzeyinden alınan SEM resimleri

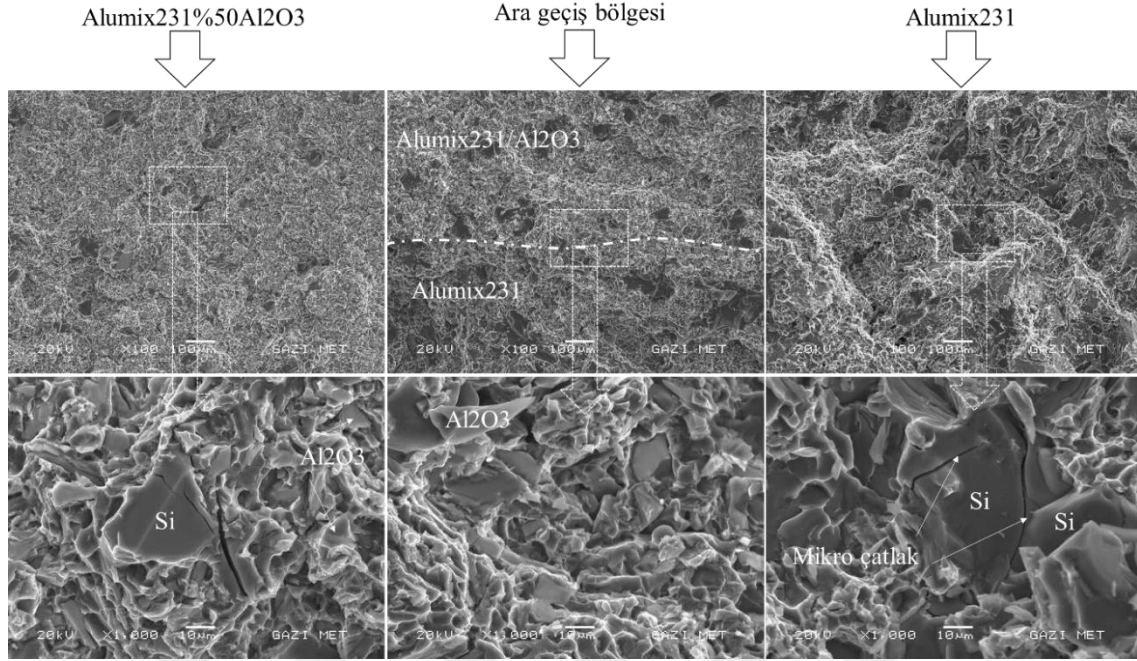
Şekil 6.32’de çapraz kırılma test sonrası kopan Alumix231/Alumix231+%50Al₂O₃ lamine kompozit malzemenin kırık yüzeyinden alınan ara geçiş bölgesinin SEM resmi ve EDS sonucu verilmiştir. Ara geçiş bölgesinden alınan EDS sonucuna göre 2 numaralı koyu gri renkte duran parçacığın Si, 1 numaralı açık gri renkte duran parçacığın ise Al₂O₃ parçacığı olduğu belirlendi.

Ara geçiş bölgesi



Şekil 6.32. Çapraz kırılma test sonrası Alumix231/Alumix231+%50Al₂O₃ kompozit malzemenin ara geçiş bölgesinden alınan (a) SEM resmi (b) 1 numaralı bölgenin (c) 2 numaralı bölgenin EDS

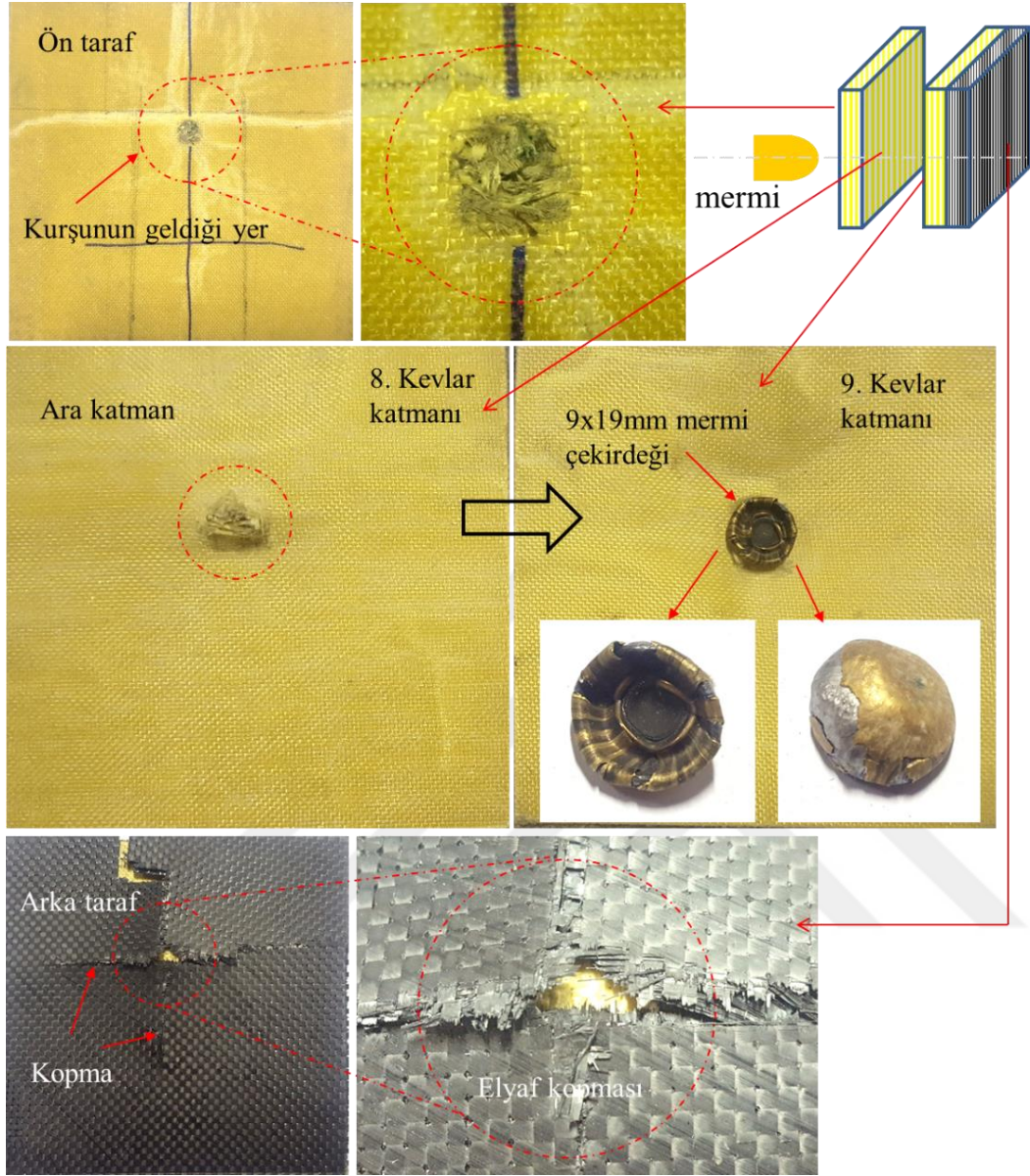
Şekil 6.33’de yer alan kırık yüzeylerin resimlerini incelediğimizde Al₂O₃ takviyeli olan tarafta matris yapı içerisinde olan Al₂O₃ parçacıklarının matris yapıdan ayrılmadan kırılarak kaldığı gözlemlendi. Bu durum Al₂O₃ parçacıkların matris yapı ile uyumlu ve kuvvetli bir bağlanma ara yüzeyi oluşturmasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca Alumix231 alaşım tarafında ise bazı Si parçacıkların çatlak oluşturduğu ve koptuğu görüldü. Alumix231/Alumix231+%50Al₂O₃ lamine kompozit malzemelerin çapraz kırılma dayanımları SiC ve B₄C parçacık takviyeli kompozit malzemelere göre yüksek çıkmasının nedenlerinden bir tanesi Al₂O₃ parçacıklarının matris fazı ile daha iyi bir ara yüzey uyumu oluşturmasıdır. Bu iyi bağlanmanın çapraz kırılma anında çatlak oluşumun ilerlemesinde bir engel oluşturduğu düşünülmektedir.



Şekil 6.33. Çapraz kırılma test sonrası Alumix231/Alumix231+%50Al₂O₃ kompozit malzemenin kırık yüzeyinden alınan SEM resimleri

6.11. Balistik Test Sonuçları

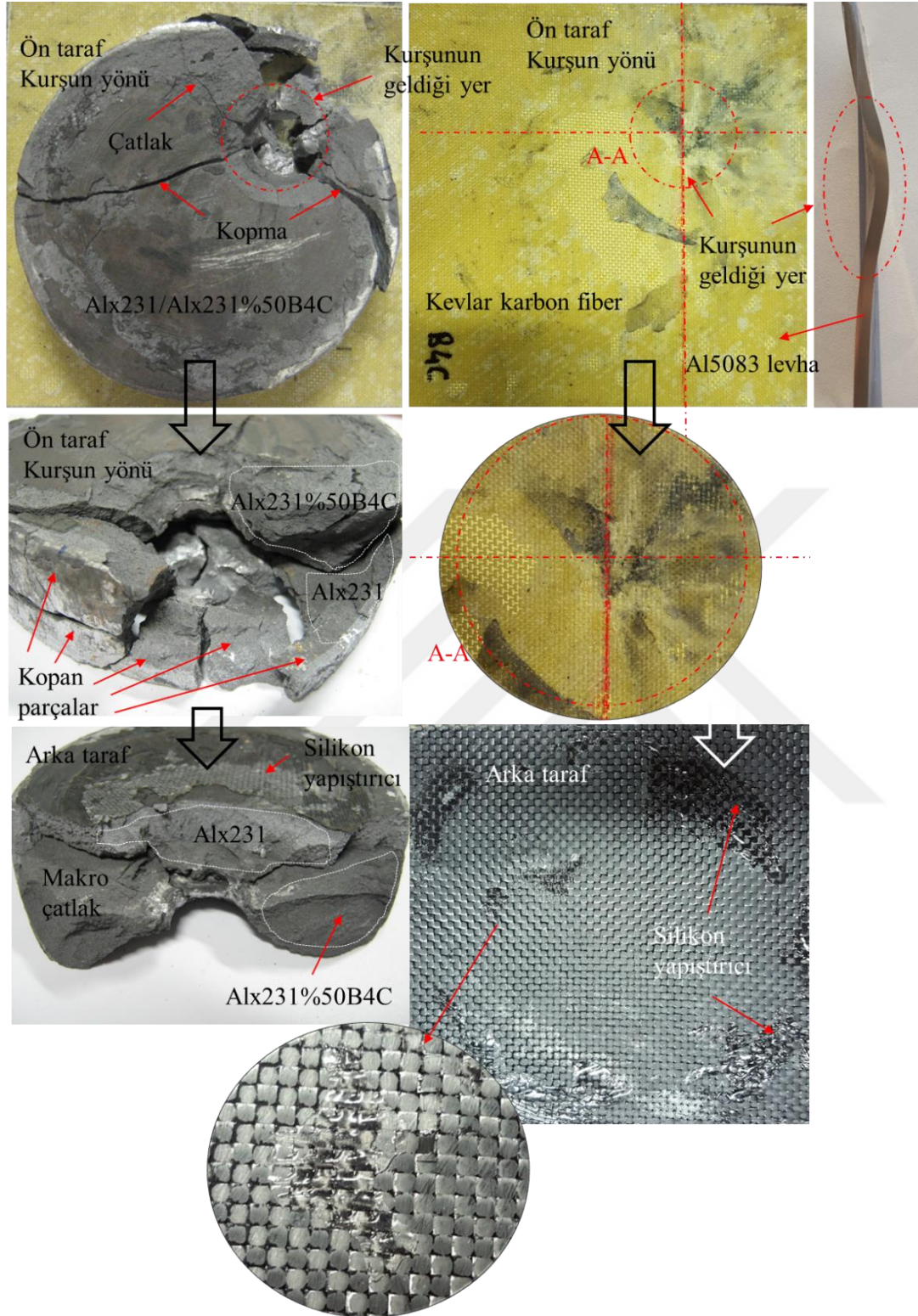
Polimer matrisli kevlar/karbon fiber hibrid kompozit levhalara (8 mm kalınlık) MP5 tüfeği ile 9x19 mm'lik mermilerle atış yapıldı. 9x19 mm'lik mermilerle atış sonrası malzemelerin kesit görünümüleri Şekil 6.34'de verilmiştir. Mermi, levlanın kevlar tarafından atılmış olup karbon fiber kısım arka tarafta kalmıştır. Merminin ilk çarptığı kevlar tarafta fiberlerde yırtılmalar meydana geldi ve mermi çekirdeği kompozit plakanın içine girdi. İçeri giren mermi çekirdeği 8 katman içeri gittikten sonra 9. kevlar katmanında durdu. 9. kevlar katmanında duran mermi çekirdeği 9. katmandaki kevlar fiberlerinde herhangi bir delinme oluşturmadı. Mermi ekirdeği kompozit levha içerisinde yer değiştirirken 8. ve 9. kevlar katmanlarını birbirinden ayırdı. Bu durum kevlar katmanları arasında polimerin çok iyi bir bağlanma gerekleştirememesinden kaynaklanmaktadır. Mermi ekirdeğinin levhada oluşturmuş olduğu gerilim yığılması ile kompozit levhanın arka kısmındaki karbon fiber katmanlarının koparak liflerin birbirinden ayrılmasına sebebiyet vermiştir. Ayrıca yığılmanın etkisi ile mermi çekirdeği de deforme olarak Şekil 6.34'de görüldüğü üzere ucu küresel olan yassı bir şekil aldı.



Şekil 6.34. Vakum infüzyon yöntemi ile üretilen kevlar karbon fiber kompozit levhalara MP5 tüfeği ile 9x19 mm’lik mermiyle yapılan atış sonrası görünüşleri

Şekil 6.35’de Alumix231/Alumix231+%50B₄C lamine kompozit ile kevlar/karbon fiber kompozit malzemenin silikon yapıştırıcı ile bir araya getirilmesi sonucu elde edilen kompozit malzemenin 7,62x51 mm yumuşak uçlu mermi karşısındaki tahribatı görülmektedir. Merminin atış yönü ön tarafta Alumix231+%50B₄C, arka tarafta da kevlar/karbon fiber olacak şekilde yapıldı. Dolayısı ile merminin ilk temas ettiği yüzey Alumix231+%50B₄C’dir. Mermi hedefe vurduktan sonra metal matrisli lamine kompozit malzemeyi parçalara ayırdı ve ayrıca yüzeyde çatlak oluşumuna neden oldu. Metal matrisli kompozit malzemeyi parçalara ayıran mermi kevlar/karbon fiber kompozit malzeme tarafından durduruldu. Ön yüzde merminin hareketini zayıflatan

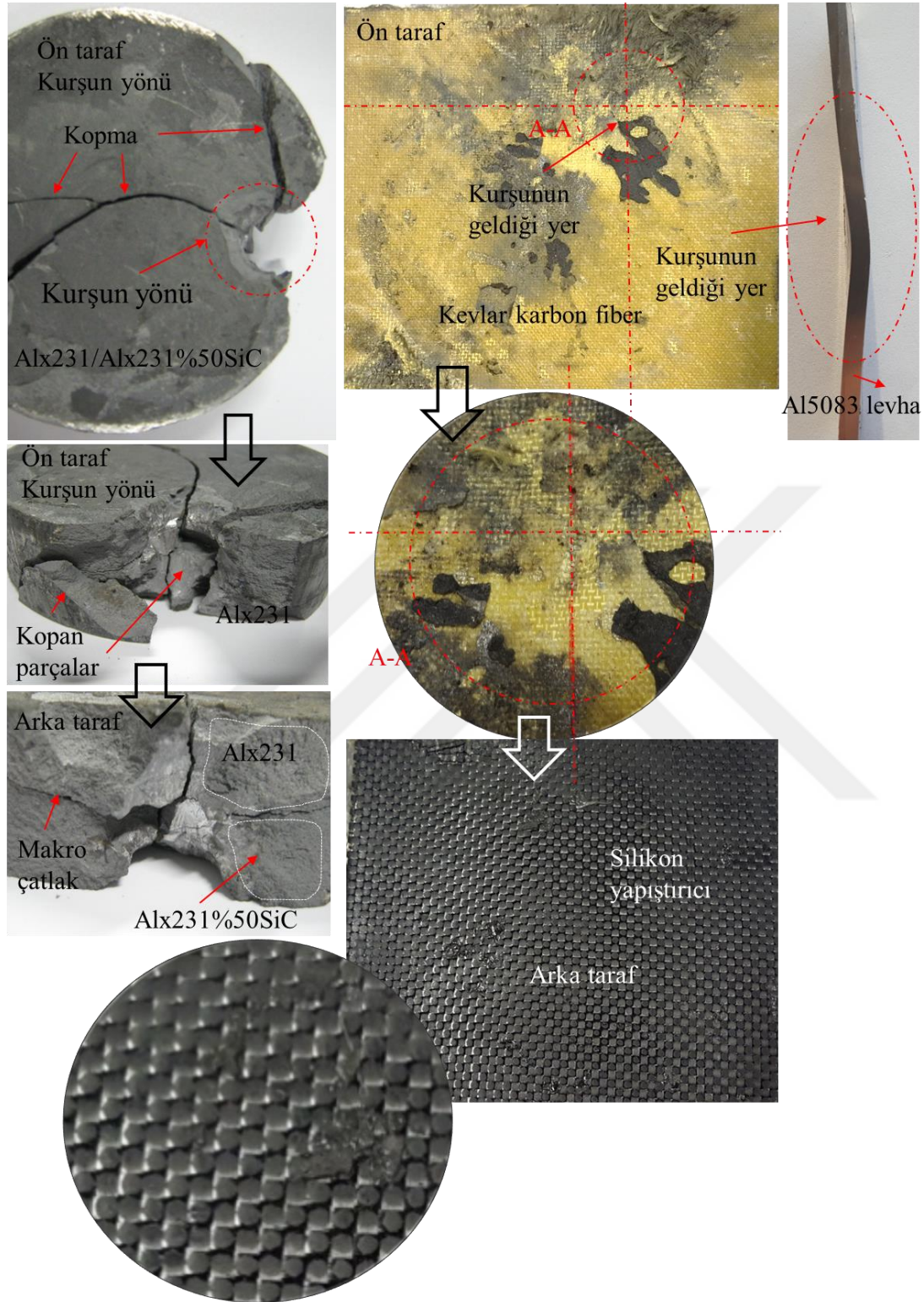
Alumix231/Alumix231+%50B₄C kompozit lamine, merminin kevlar/karbon fiber malzemede hareket edememesine ve merminin kevların üst yüzeyinde durmasına yardımcı oldu. Kurşunun ilk çarptığı yüzeyde mermi radyal çatlak ve radyal kopma meydana getirerek bir delik oluşturdu. Ayrıca deliğe dik olan kesit yüzeyindeki kopmalara bakıldığında Alumix231/Alumix231+%50B₄C malzemenin ara geçiş bölgesinde çatlaklar ve ayrılmaların meydana geldiği görüldü. Kevlar tarafına çarpan kurşun kevlar yüzeyinde gerilme matris çatlakları oluşturdu. Arka kısımda yer alan karbon fiberde ise herhangi bir hasar meydana gelmedi. Merminin oluşturmuş olduğu basınç yığılması ile arka tarafta yer alan Al5083 sac levhada ise deformasyon meydana geldi. Bu deformasyon merminin hareket yönünde ve çöküntü şeklinde oluştu. Arka kısma konulan Al5083 sac levha, delinme özelliği göstermeyen kompozit malzemelerde balistik performansı karşılaştırılabilmek için penetrasyon derinliği ve çökme oranlarını hesaplamak amacıyla kullanıldı. Kompozit malzemelerin bu çökme oranları hesaplanırken, Al5083 sac levhadan dikine kesit alınarak çökme miktarı değerlendirildi.



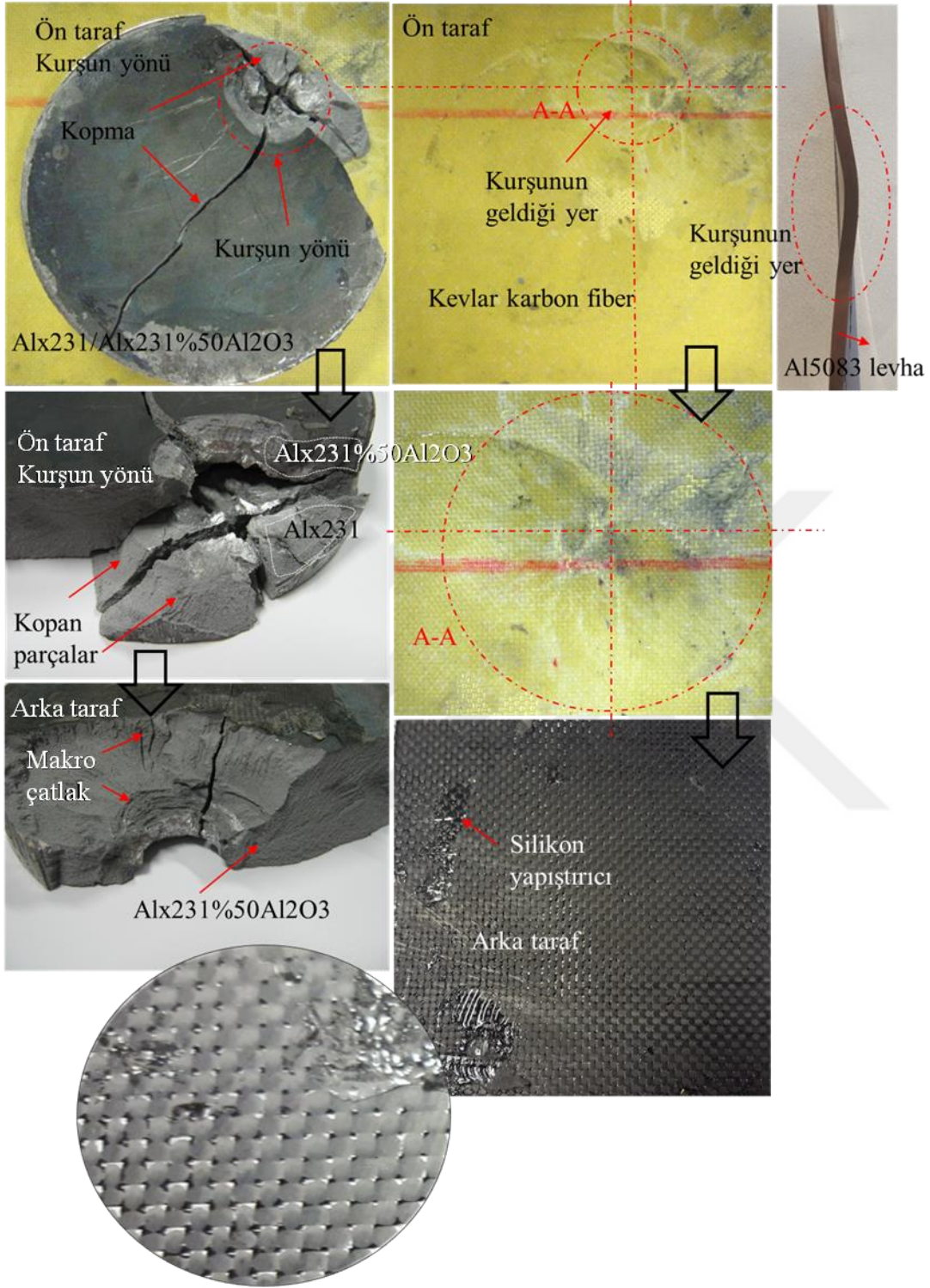
Şekil 6.35. Alumix231/Alumix231+%50B₄C, kevlar/karbon fiber ve Al5083 malzemelerin birleştirilmesi ile elde edilen kompozit sistemin 7,62x51 mm mermiler karşısındaki balistik testi

Şekil 6.36'da Alumix231/Alumix231+%50SiC, kevlar/karbon fiber ve Al5083 malzemelerin birleştirilmesi ile elde edilen kompozit sistemin 7,62x51 mm mermiler karşısındaki balistik test sonrası görünümü verilmektedir. Merminin ilk temas ettiği yüzeyde parçalanarak kopmaların meydana geldiği ve merminin giriş kısmında parlak görünümlü yerde çarpmanın etkisi ile kısmi erimenin olduğu gözlemlendi. Ayrıca merminin ilk temas ettiği yerde radyal çatlak ve kopmalar oluştuğu görüldü. Mermi vurduktan sonra Alumix231 ile Alumix231+%50SiC takviye arasındaki ara yüzeyde makro çatlak oluşumlarını tetikledi ve bu yüzeyde kopmalar meydana geldi. Mermi parçaya çarptıktan sonra bir miktar ilerledi, sonra numuneyi parçalayarak alt tarafta yer alan kevlara isabet etti ve bu isabet neticesinde kevlar tarafında radyal izlerin oluşmasına neden oldu. Kompozit levhanın arka kısmındaki karbon fiberde ise herhangi bir hasar meydana gelmediği görüldü. Merminin kevlar kompozit levhada oluşturmuş olduğu kuvvet ile arka tarafta yer alan Al5083 levhada çökme meydana geldi.

Şekil 6.37'de Alumix231/Alumix231+%50Al₂O₃, kevlar/karbon fiber ve Al5083 malzemelerin birleştirilmesi ile elde edilen kompozit sistemin 7,62x51 mm mermiler karşısındaki balistik test sonrası görünümü verilmektedir. Merminin ilk vurduğu yerde kopmalar ve çatlak oluşumları meydana geldi. Merminin çarpmanın etkisi ile hareket etmek istediği fakat kompozit levhanın merminin hareketini kısıtlayarak durdurduğu anlaşıldı. Mermi hareket yönünde yığılma meydana getirerek kompozit levhayı parçalara ayırdı. Levhanın kopan yüzeylerine baktığımızda Alumix231 ile Alumix231+%50Al₂O₃ ara yüzeyinde herhangi bir ayrılma meydana gelmediği görüldü. Bu durum Alumix231 alaşımı ile Al₂O₃ parçacıkların iyi bir ara yüzey bağlanması gerçekleştirmesinden kaynaklanmaktadır. Merminin giriş yaptığı kısmın arka tarafında radyal çatlakların oluştuğu görüldü. Kevlar ve karbon fiber tarafında ise herhangi bir hasarın oluşmadığı gözlemlenirken Al5083 sac levhada bir miktar çökmenin oluştuğu gözlemlendi. Kompozit malzemelerin arka kısmında yer alan Al5083 sac levhada oluşan çökme miktarları ve penetrasyon miktarları sayısal olarak hesaplandı ve kompozit malzemelerin birbiri ile balistik açıdan kıyaslanması yapıldı.

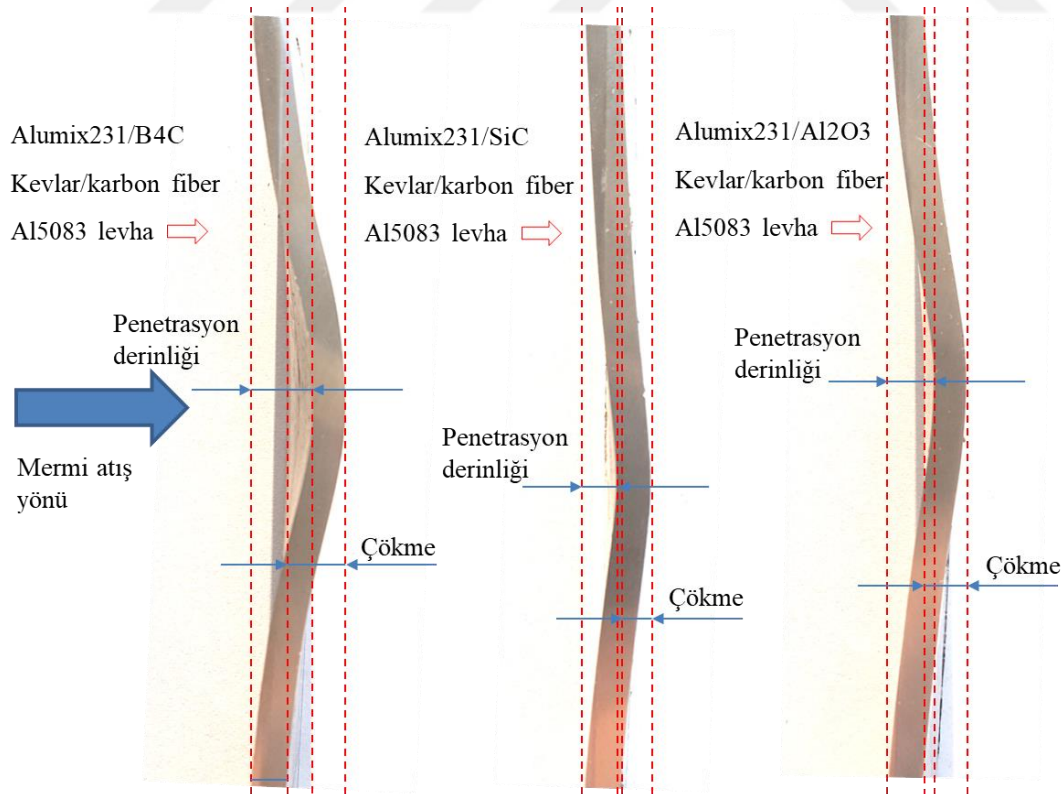


Şekil 6.36. Alumix231/Alumix231+%50SiC, kevlar/karbon fiber ve Al5083 malzemelerin birleştirilmesi ile elde edilen kompozit sistemin 7,62x51 mm mermiler karşısındaki balistik testi

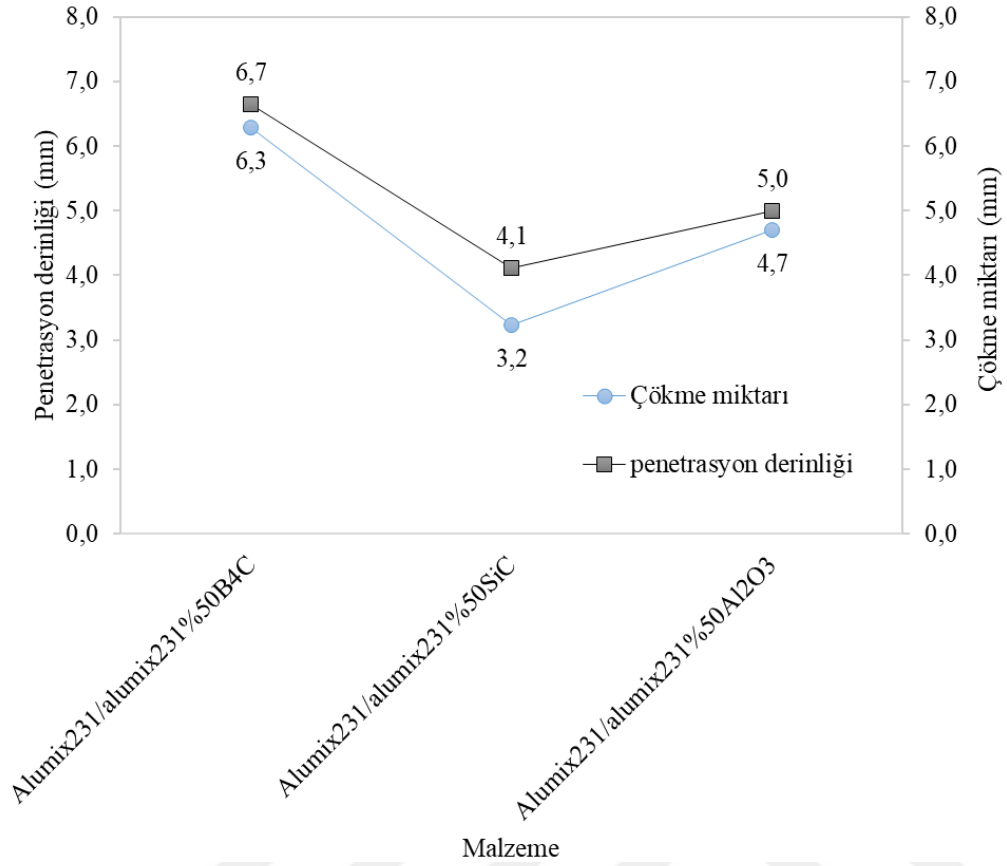


Şekil 6.37. Alumix231/Alumix231+%50Al₂O₃, kevlar/karbon fiber ve Al5083 malzemelerin birleştirilmesi ile elde edilen kompozit sistemin 7,62x51 mm mermiler karşısındaki balistik testi

Şekil 6.38’de kompozit sistemlere 7,62x51 mm yumuşak uçlu merminin isabet etmesi ile arka tarafta yer alan Al5083 malzemelerde oluşan penetrasyon derinliği ve çökme hasar resmi verilmiştir. Her üç tip kompozit sistemin de 7,62x51 mm’lik mermileri durdurduğu ve balistik direncinin olduğu anlaşıldı. Bu üç tip kompozit sistemde oluşan hasar mekanizmaları birbirine benzemekle beraber arka taraflarında yer alan Al5083 levhada oluşturmuş oldukları tahribat aynı şiddette değildir. Merminin hareketi doğrultusunda arka tarafta yer alan Al5083 levhaya bir basınç kuvveti oluşturduğu bilinmektedir. Oluşan tahribatın miktarı kumpas yardımı ile ölçülüp çökme miktarı grafik ortaya çıkarıldı (Şekil 6.39). Grafikte penetrasyon derinliği ve çökme miktarı olmak üzere iki ayrı değer mevcuttur. Grafiğe bakıldığında en yüksek penetrasyon derinliği 6,7 mm ile Alumix231/Alumix231+%50B₄C, kevlar/karbon fiber ve Al5083 sac levha ile birleştirilen kompozit sistemde gerçekleşti. En düşük penetrasyon derinliği ise Alumix231/Alumix231+%50SiC, kevlar/karbon fiber ve Al5083 sac levha ile birleştirilen kompozit sistemde (4,1 mm) gerçekleşti. Alumix231/Alumix231+%50Al₂O₃, kevlar/karbon fiber ve Al5083 sac levha ile birleştirilen kompozit sistemde ise penetrasyon derinliği 5 mm ile diğer iki kompozit malzeme arasında bir değere sahip oldu.



Şekil 6.38. Kompozit sistemlerin balistik test sonrası Al5083 levhada oluşan hasarı



Şekil 6.39. Kompozit sistemlerin balistik test sonrası penetrasyon derinliği ve çökme miktarı

Elde edilen sonuçlar neticesinde Alumix231/Alumix231+%50Al₂O₃, kevlar/karbon fiber ve Al5083 sac levha ile birleştirilen kompozit sistemin, en yüksek sertlik değerine, en yüksek çapraz kırılma dayanımına, Al5083 levhanın düşük çökme miktarına sahip olması ve Al₂O₃ parçacıkların Alumix231 matris yapı ile uyumlu ve kuvvetli bir bağlanma arayüzeyi oluşturmasından dolayı en iyi balistik performansa sahip olduğu düşünülmektedir.

7. SONUÇLAR

Bu çalışmada, polimer matrisli kevlar/karbon fiber takviyeli hibrit kompozit malzemeler vakum infüzyon yöntemi ile üretilmiştir. Ayrıca, Alumix231 esaslı B_4C , SiC ve Al_2O_3 parçacık takviyeli lamine kompozit malzemeler toz metalurjisi yöntemi ile üretilmiştir. Üretilen kompozitlerin mekanik özellikleri incelenmiş ve polimer matrisli kompozit malzeme ile metal matrisli kompozit malzemenin birleştirilmesi ile elde edilen parçaların balistik performansları araştırılmıştır. Yapılan araştırmalar neticesinde aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

- PMK malzemelerde en yüksek akma dayanım değerinin kevlar kompozit malzemesinde 278 MPa değerinde olduğu gözlemlenirken, en düşük akma dayanımının ise 62 MPa değeri ile karbon fiber/kevlar kompozit malzemedede olduğu gözlemlenmiştir.
- PMK malzemelerde en yüksek kopma dayanımının 652 MPa değeri ile karbon fiber takviyeli kompozit malzemedede olduğu gözlemlenmiştir. En düşük kopma dayanımının ise karbon fiber/kevlar kompozit malzemesinde ve 236 MPa değerinde olduğu gözlenmiştir.
- PMK malzemelerde kompozitlerin eğilme dayanımı değerlerini incelediğimizde en yüksek eğilme dayanımı karbon fiber takviyeli kompozitte, en düşük eğilme dayanımı ise kevlar takviyeli kompozitte meydana gelmiştir.
- PMK malzemelerde en yüksek basma dayanımı karbon fiber takviyeli kompozitte gözlemlenmiştir (270 MPa). En düşük basma dayanımı ise kevlar takviyeli kompozitte gözlemlenmiştir (46 MPa).
- PMK malzemelerde en yüksek delme dayanımının kevlar (ön) – karbon fiber (arka) kompozit malzemedede olduğu gözlemlenmiştir.
- MMK malzemelerde en yüksek yoğunluk %99,5 ile $Al_{x231}/Al_{x231}+\%50Al_2O_3$ kompozit malzemelerinde görüldü. $Al_{x231}/Al_{x231}+\%50SiC$ kompozit malzemesinde %98,6, $Al_{x231}/Al_{x231}+\%50B_4C$ kompozit malzemesinde ise %97,8 olduğu görülmüştür.
- MMK malzemelerde B_4C parçacık takviyeli lamine kompozit levhalarda, B_4C parçacık takviyeli tarafta gözenek oluşumları meydana gelmiştir. SiC parçacık takviyeli lamine kompozit malzemelerde ise alüminyum matris ile SiC parçacıkları arasında gözeneklerin çok az olduğu görülmüştür. Al_2O_3 parçacık takviyeli lamine kompozit

malzemelerde SiC parçacık takviyeli kompozitlerde olduğu gibi herhangi bir gözenek oluşmadığı görülmüştür.

- MMK malzemeler üzerinden yedişer sertlik değerleri alındı. En yüksek sertlik değerlerinin Alumix231/Alumix231+%50Al₂O₃ kompozit malzemesinde olduğu görüldü. Daha sonra ikinci sert malzeme Alumix231/Alumix231+%50SiC olurken en düşük sertlikte olan malzemenin Alumix231/Alumix231+%50B₄C olduğu görüldü.
- En yüksek çapraz kırılma dayanımı Alumix231/Alumix231+%50Al₂O₃ kompozit malzemelerde 189 MPa olarak bulunmuştur. En düşük çapraz kırılma dayanımı ise Alumix231/Alumix231+%50B₄C kompozit malzemelerde (121 MPa) olarak bulunmuştur. Alumix231/Alumix231+%50SiC kompozitlerde ise dayanım 158 MPa olarak belirlenmiştir.
- Kompozit sistemde en yüksek penetrasyon derinliği 6,7 mm ile Alumix231/Alumix231+%50B₄C, kevlar/karbon fiber ve Al5083 sac levha ile birleştirilen kompozit sistemde gerçekleşmiştir. En düşük penetrasyon derinliği ise 4,1 mm ile Alumix231/Alumix231+%50SiC, kevlar/karbon fiber ve Al5083 sac levha ile birleştirilen kompozit sistemde gerçekleşmiştir. Alumix231/Alumix231+%50Al₂O₃, kevlar karbon fiber ve Al5083 sac levha ile birleştirilen kompozit sistemde 5 mm penetrasyon derinliği oluşmuştur.
- Alumix231/Alumix231+%50Al₂O₃, kevlar/karbon fiber ve Al5083 sac levha ile birleştirilen kompozit sistemin, en yüksek sertlik değerine, en yüksek çapraz kırılma dayanımına, Al5083 levhanın düşük çökme miktarına sahip olması ve Al₂O₃ parçacıkların Alumix231 matris yapı ile uyumlu ve kuvvetli bir bağlanma ara yüzeyi oluşturmasından dolayı en iyi balistik performansa sahip olduğu düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- Abrate, S. (2011). *Impact Engineering Of Composite Structures*. New York: SpringerWien, 97-107.
- Advani, S. G. and Hsiao, K.-T. (2012). *Manufacturing techniques for polymer matrix composites*. UK: Woodhead Publishing Limited, 310-314.
- Alizadeh, M., Alizadeh, M. and Amini, R. (2013). Structural and Mechanical Properties of Al/B4C Composites Fabricated by Wet Attrition Milling and Hot Extrusion. *Journal of Materials Science & Technology*, 1-6.
- AL-Oqla, F. M. and Salit, M. S. (2017). *Materials Selection For Natural Fiber Composites*. UK: Woodhead Publishing, 5-7.
- ASTM. (2008). D3039/D3039M-08, Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials. United States.
- Aydın, M. and Apalak, M. K. (2016). Experimental damage analysis of Al/SiC functionally graded sandwich plates under ballistic impact. *Materials Science&Engineering A*, 671, 107-117.
- Bandaru, A. K., Vetiyatil, L. and Ahmad, S. (2015). The effect of hybridization on the ballistic impact behavior of hybrid composite armors. *Composites Part B*, 76, 300-319.
- Baradeswaran, A. and Perumal, A. E. (2013). Influence of B4C on the tribological and mechanical properties of Al 7075–B4C composites. *Composites Part B: Engineering*, 54, 146-152.
- Barbero, E. J. (2017). *Introduction To Composite Materials Design (Third Edition)*. USA: CRC Press, 59-63.
- Bayraktar, Ö. (2016). *Öngerilimli Karbon Elyaf Takviyeli Kompozit Üretimi İçin Sistem Tasarımı, İmalatı Ve Kompozit Malzeme Üretimi*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 13-14.
- Bhatnagar, A. (2016). *Lightweight Ballistic Composites: Military and Law-Enforcement Applications (Second Edition)*. UK: Elsevier, 87.
- Callister, W. D. and Rethwisch, D. G. (2014). *Materials Science And Engineering (Ninth Edition)*. USA: Wiley, 654-655.
- Cardarelli, F. (2008). *Materials Handbook (Second Edition)*. UK: Springer, 1029-1035.
- Carlucci, D. E. and Jacobson, S. S. (2007). *Ballistics: Theory and Design of Guns and Ammunition (Second Edition)*. USA: CRC Press, 3-367.

- Dickson, A. N., Barry, J. N., McDonnell, K. A. and Dowling, D. P. (2017). Fabrication of continuous carbon, glass and Kevlar fibre reinforced polymer composites using additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, 16, 146-152.
- Dimitriou, E. and Petralia, M. (2010). *Ceramic And Polymer Matrix Composites: Properties, Performance And Applications*. New York: Nova Science Publishers, 2-4.
- Ebrahimi, F. (2016). *Advances in Functionally Graded Materials and Structures*. UK: InTechOpen, 2-21.
- Edison, T. A. (1880). *Patent No. 223, 898*. USA.
- Fidan, S., Sınmazçelik, T., Bora, M. Ö. ve Çoban, O. (2010). Düşük Hızlı Darbe Yüklemleri Sonrası Cam Fiber Takviyeli Polyester Kompozitlerde Ortaya Çıkan Hasar Konisinin İncelenmesi. *Mühendis ve Makine*, 51 (611), 1-8.
- Gode, C. (2013). Mechanical properties of hot pressed SiCp and B4Cp/Alumix 123 composites alloyed with minor Zr. *Composites: Part B*, 34-40.
- Islam, M. A. and Farhat, Z. N. (2011). The influence of porosity and hot isostatic pressing treatment on wear characteristics of cast and P/M aluminum alloys. *Wear*, 271, 1594-1601.
- İnternet: *Aramid Fiber Advantages-Disadvantages*. URL: <http://www.aramid.eu/advantages---disadvantages.html>, Son Erişim Tarihi: 28.04.2019.
- İnternet: *BilgiUstam. Kompozit Malzemeler Hakkında Herşey*. URL: <http://www.bilgiustam.com/kompozit-malzemeler-hakkinda-hersey/>, Son Erişim Tarihi: 11.03.2019.
- Jamaludin, S. N., Mustapha, F., Nuruzzaman, D. M. and Basri, S. N. (2013). A review on the fabrication techniques of functionally graded ceramic-metallic materials in advanced composites. *Scientific Research and Essays*, 8(21), 828-840.
- Jin, F.-L., Li, X. and Park, S.-J. (2015). Synthesis and application of epoxy resins: A review. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 29, 1-11.
- Kalantar, J. and Drzal, L. T. (1990). The bonding mechanism of aramid fibres to epoxy matrices - Part II An experimental investigation. *Chemical Engineering and Materials Science*, 25, 4194-4202.
- Kapidzic, Z., Nilsson, L. and Ansell, H. (2014). Finite element modeling of mechanically fastened composite-aluminum joints in aircraft structures. *Composite Structures*, 109, 198-210.
- Kar, K. K. (2017). *Composite Materials Processing, Applications, Characterizations*. UK: Springer, 3-9.

- Karakoç, H. (2017). *TM Yöntemi İle B4C Takviyeli AA6061 Metal Matrisli Kompozit Malzemelerin Üretimi, Mekanik Özelliklerinin Ve Balistik Performansının İncelenmesi*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 55-74.
- Karakoç, H., Esenkaya, B., Çinici, H. ve Çıtak, R. (2018). Vakum İnfüzyon Yöntemi İle Üretilen Bor Karbür Parçacık Katkılı Karbon Fiber/Kevlar Hibrid Kompozit Levhaların Basma Dayanımlarının İncelenmesi. *3rd International Conference on Material Science and Technology*, Nevşehir, 529-532.
- Karamış, M., Nair, F. and Cerit, A. (2009). The metallurgical and deformation behaviours of laminar metal matrix composites after ballistic impact. *Journal of Materials Processing Technology*, 209, 4880-4889.
- Kimpara, I. (1991). Use of Advanced Composite Materials in Marine Vehicles. *Marine Structures*, 4, 117-127.
- Kneubuehl, B. P. (2003). *Ballistic protection*. Switzerland, 1-8.
- Knoppers, R., Gunnink, J. W. and van den Hout, V. V. (2005). The reality of functionally graded material products. *Intelligent Production Machines and Systems*, 467-474.
- Krishnaraj, V., Zitoun, R. and Davim, J. P. (2013). *Drilling of Polymer-Matrix Composites*. UK: Springer, 3-8.
- Kurzawa, A., Pyka, D., Jamroziak, K., Bocian, M., Kotowski, P. and Widomski, P. (2018). Analysis of ballistic resistance of composites based on EN AC-44200 aluminum alloy reinforced with Al₂O₃ particles. *Composite Structures*, 201, 834-844.
- Lee, B.-S. and Kang, S. (2001). Low-temperature processing of B4C-Al composites via infiltration technique. *Materials Chemistry and Physics*, 67, 249-255.
- Lee, H. and Neville, K. (1967). *Handbook Of Epoxy Resins (First Edition)*. New York: McGraw-Hill Book Company, 1-7.
- Mahamood, R. M. and Akinlabi, E. T. (2017). *Functionally Graded Materials*. Switzerland: Springer, 1-5.
- Mallick, P. (2007). *Fiber-Reinforced Composites: Materials, Manufacturing and Design (Third Edition)*. USA: CRC Press.
- Mazahery, A. and Shabani, M. O. (2012). Influence of the hard coated B4C particulates on wear resistance of Al-Cu alloys. *Composites Part B: Engineering*, 43, 1302-1308.
- Mondal, D., Ganesh, N., Muneshwar, V., Das, S. and Ramakrishnan, N. (2006). Effect of SiC concentration and strain rate on the compressive deformation behaviour of 2014Al-SiCp composite. *Materials Science and Engineering: A*, 433, 18-31.
- Niino, M., Hirai, T. and Watanabe, R. (1987). The functionally gradient materials. *Japan Society for Composite Materials*, 257-264.

- Paiva, J. M., Mayer, S. and Rezende, M. C. (2006). Comparison of Tensile Strength of Different Carbon Fabric Reinforced Epoxy Composites. *Materials Research*, 9, 83-89.
- Pandya, K. S., Pothnis, J. R., Ravikumar, G. and Naik, N. (2013). Ballistic impact behavior of hybrid composites. *Materials and Design*, 44, 128-135.
- Park, S.-J. (2015). *Carbon Fibers*. UK: Springer, 21-265.
- Park, S.-J. and Seo, M.-K. (2011). *Interface Science and Composites*. UK: Elsevier, 492-494.
- Paulino, G. H., Yin, H. M. and Sun, L. Z. (2006). Micromechanics-based Interfacial Debonding Model for Damage of Functionally Graded Materials with Particle Interactions. *International Journal of Damage Mechanics*, 15, 267-288.
- Pol, N., Verma, G., Pandey, R. and Shanmugasundaram, T. (2018). Fabrication of AA7005/TiB₂-B₄C surface composite by friction stir processing: Evaluation of ballistic behaviour. *Defence Technology*, 1-6.
- Potoğlu, U. (2012). *Sandviç Kompozit Plakaların Darbe Davranışları*, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 14-22.
- Poveda, R. L. and Gupta, N. (2016). *Carbon Nanofiber Reinforced Polymer Composites*. UK: Springer, 1-6.
- Rana, S. and Figueiro, R. (2016). *Fibrous and Textile Materials for Composite Applications*. UK: Springer, 1-14.
- Randjbaran, E., Zahari, R., Jalil, N. A. and Majid, D. L. (2014). Hybrid Composite Laminates Reinforced with Kevlar/Carbon/Glass Woven Fabrics for Ballistic Impact Testing. *The Scientific World Journal*, 2014, 1-7.
- Safri, S. N., Sultan, M. T., Jawaid, M. and Jayakrishna, K. (2018). Impact behaviour of hybrid composites for structural applications. *Composites Part B*, 133, 112-121.
- Sapuan, S. (2017). *Composite Materials*. UK: Elsevier, 57-67.
- Sayer, M. (2009). *Hibrit Kompozitlerin Darbe Davranışlarının İncelenmesi*, Doktora Tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli, 45-57.
- Shen, H.-S. (2009). *Functionally Graded Materials Nonlinear Analysis of Plates and Shells*. USA: CRC Press, 1-3.
- Sorrentino, L., Bellini, C., Corrado, A., Polini, W. and Aricò, R. (2015). Ballistic performance evaluation of composite laminates in kevlar 29. *Procedia Engineering*, 88, 255-262.

- Sözen, E., Gündüz, G. ve İmren, E. (2016). Balistik Panel Ve Koruyucu Zırh Üretiminde Kullanılan Lif Ve Kompozit Malzemeler. *Bartın Orman Fakültesi Dergisi*, 18, 193-204.
- SP Systems. (2017). *Guide To Composites*. England, 1-3.
- Srinivasa, V., Shivakumar, V., Nayaka, V., Jagadeeshaiah, S., Seetharam, M., Shenoy, R. and Nafidi, A. (2010). Fracture Morphology of Carbon Fiber Reinforced Plastic Composite Laminates. *Materials Research*, 13, 417-424.
- Toptan, F., Kumdalı, F. ve Kerti, I. (2006). Al-B4C kompozitlerinin fren diski olarak kullanılabilirliğine genel bir bakış. *Metalurji*, 145, 11-18.
- Vencl, A., Bobic, I., Arostegui, S., Bobic, B., Marinković, A. and Babić, M. (2010). Structural, mechanical and tribological properties of A356 aluminium alloy reinforced with Al₂O₃, SiC and SiC+ graphite particles. *Journal of Alloys and Compounds*, 506, 631-639.
- Yahaya, R., Sapuan, S., Jawaid, M., Leman, Z. and Zainudin, E. (2014). Quasi-static penetration and ballistic properties of kenaf–aramid hybrid composites. *Materials and Design* 63, 775-782.
- Yumak, N., Pekbey, Y. ve Aslantaş, K. (2013). Zırh Tasarımında Kullanılan Kompozit Malzemelerin Deformasyon. *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 10, 1-21.



ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : ESENKAYA, Burak
 Uyuğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 16.09.1993, Ankara
 Medeni hali : Bekar
 Telefon : 0 (533) 503 68 83
 e-mail : esenkaya_burak@hotmail.com



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi / Metalurji ve Malzeme Mühendisliği	Devam ediyor
Lisans	Gazi Üniversitesi / Metalurji ve Malzeme Mühendisliği	2016
Lise	Gazi Üniversitesi Vakfı Özel Fen Lisesi	2011

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2019-Halen	Doratek Medikal	Satış Pazarlama Şefi
2016-2017	Ankes Makina	Satış Temsilcisi

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

Karakoç, H., Esenkaya, B., Çinici, H., & Çıtak, R. (2018). *Vakum İnfüzyon Yöntemi İle Üretilen Bor Karbür Parçacık Katkılı Karbon Fiber/Kevlar Hibrid Kompozit Levhaların Basma Dayanımlarının İncelenmesi*. 3rd International Conference on Material Science and Technology, (s. 529-532). Nevşehir.

Hobiler

Yüzme, Perküsyon müzik aletleri



GAZİ GELECEKTİR...