

T.C.
ONDOKUZ MAYIS ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI



**ŞERİT DÖKÜM YÖNTEMİYLE GRAFEN TAKVİYELİ
Ti-6Al-4V KOMPOZİTLERİN ÜRETİMİ VE
KARAKTERİZASYONU**

Doktora Tezi

Emine Özlem DENGİZ

Danışman

Doç. Dr. Mevlüt GÜRBÜZ

Bu çalışma Ondokuz Mayıs Üniversitesi tarafından PYO.MUH.1901.22.003 proje numarası ile desteklenmiştir.

SAMSUN
2024

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK BEYANI

Hazırladığım Doktora tezinin bütün aşamalarında bilimsel etiğe ve akademik kurallara riayet ettiğimi, çalışmada doğrudan veya dolaylı olarak kullandığım her alıntıya kaynak gösterdiğimi ve yararlandığım eserlerin Kaynaklar'da gösterilenlerden oluştuğunu, her unsurun enstitü yazım kılavuzuna uygun yazıldığını ve TÜBİTAK Araştırma ve Yayın Etiği Kurulu Yönetmeliği'nin 3. bölüm 9. maddesinde belirtilen durumlara aykırı davranılmadığını taahhüt ve beyan ederim.

Etik Kurul Gerekli mi ?

Evet ☐ (Gerekli ise ekler kısmına ekleyiniz)

Hayır ☒

26 /02/ 2024
Emine Özlem DENGİZ

TEZ ÇALIŞMASI ÖZGÜNLÜK RAPORU BEYANI

Tez Başlığı : ŞERİT DÖKÜM YÖNTEMİYLE GRAFEN TAKVİYELİ Ti-6Al-4V KOMPOZİTLERİN ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU

Yukarıda başlığı belirtilen tez çalışması için şahsım tarafından 01/03/2024 tarihinde intihal tespit programından alınmış olan özgünlük raporu sonucunda;

Benzerlik oranı : % 19

Tek kaynak oranı : % 5 çıkmıştır.

01 / 03 / 2024
Doç. Dr. Mevlüt GÜRBÜZ

ÖZET

ŞERİT DÖKÜM YÖNTEMİYLE GRAFEN TAKVİYELİ Ti-6Al-4V KOMPOZİTLERİN ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU

Emine Özlem DENGİZ
Ondokuz Mayıs Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı
Doktora, Mart/2024
Danışman: Doç. Dr. Mevlüt GÜRBÜZ

Titanyum (Ti) ve alaşımları yüksek özgül mukavemet, düşük yoğunluk, yüksek kimyasal direnç ve aynı zamanda iyi biyouyumluluk sergiler. Bu özellikler de onları biyomedikal uygulamalar, uzay ve havacılık gibi alanlarda temel yapısal malzeme konumuna getirmiştir. Ti alaşımlarından üretilen tek katmanlı ve çok katmanlı levhalar bu uygulama alanlarında sıklıkla kullanılmaktadır.

Bu doktora tezinde Ti6Al4V (Ti64) alaşımının şerit döküm yöntemiyle grafen katkılı çok katmanlı kompozit levha formunda üretilmesi ve üretilen malzemenin karakterizasyon çalışmalarının yapılması amaçlanmıştır. Bu amaçla, bir takım fiziksel ve mekanik özelliklerinin güçlendirilmesi için Ti64 matris içerisine farklı oranlarda grafen takviyesi yapılmıştır. Şerit döküm yönteminde birtakım bağlayıcı, plastikleştirici ve çözücü organiklerin en uygun oranlarda ilavesiyle akışkan kıvama getirilen döküm çamuru bir altlık üzerine ince şeritler halinde dökülerek, sıyrıcı bir bıçak yardımıyla yayılır ve kurutma işlemi gerçekleştirilir. Bu çalışmada şerit döküm çamuru parametrelerinin en uygun koşullarda sağlandığı karışım oranı; %60 Ti64, %10 etanol, %10 ksilen, %3 PVB, %1 PEG ve %16 MEK kullanılan bileşim olmuştur. Döküm altlık malzemesi olarak mylar film kullanımı en iyi sonucu vermiştir. Şerit döküm yönteminde kullanılan döküm düzeneği de yine bu tez çalışması kapsamında tasarlanıp üretilerek kompozitlerin üretimi için faaliyete geçirilmiştir. $0,933 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ değeri ile en düşük aşınma oranı 30-G numunesinde görülmektedir.

Kompozitlerin üretilmesi sonrası aşınma dayanımı ve sertlik ölçümü gibi mekanik testler, termal iletkenlik davranışının incelenmesi ve içyapı incelemeleri gerçekleştirilmiştir. Böylece grafen takviyesinin uygulanma biçiminin ve takviye miktarının kompozit malzemenin özelliklerine olan etkisi incelenmiştir. SEM görüntülerine göre, presleme basıncının artmasıyla birlikte daha homojen ve yoğun bir malzeme yapısı görülmektedir. Gözeneklilik ise basınç artışı ile birlikte büyük oranda azalmıştır. En yüksek sertlik değeri 676,87 HV0,1 ile %0,45 grafen takviyesinde ölçülmüştür. Termal iletkenlik davranışına göre, 30-G kodlu numune en yüksek termal iletkenlik özelliği sergilemiştir.

Çalışmanın sonucunda, grafen takviyesinin Ti64 malzemesinin termal iletkenliğini, aşınma dayanımını ve sertlik değerini artırıcı bir etki yarattığı ortaya konulmuştur.

Anahtar Sözcükler: Ti64, Grafen, Şerit döküm yöntemi, Metal matrisli kompozitler

ABSTRACT

PRODUCTION AND CHARACTERIZATION OF Ti6Al4V COMPOSITES BY TAPE CASTING METHOD

Emine Özlem DENGİZ

Ondokuz Mayıs University

Institute of Science and Technology

Department of Mechanical Engineering

PhD, March/2024

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Mevlüt GÜRBÜZ

Titanium (Ti) and its alloys exhibit high specific strength, low density, high chemical resistance as well as good biocompatibility. These properties have made them the basic structural material in fields such as biomedical applications, space and aviation. Single-layer and multi-layer plates produced from Ti alloys are frequently used in these application areas.

In this doctoral thesis, it is aimed to produce Ti6Al4V (Ti64) alloy in the form of graphene-added multilayer composite sheet by strip casting method and to carry out characterization studies of the produced material. For this purpose, different amounts of graphene were reinforced into the Ti64 matrix to strengthen some of its physical and mechanical properties. In the strip casting method, the casting sludge, which is brought to a fluid consistency by adding some binders, plasticizers and solvent organics in the most appropriate proportions, is poured into thin strips on a substrate, spread with the help of a scraper blade and the drying process is carried out. In this study, the mixing ratio at which the strip casting mud parameters are provided under the most suitable conditions is; The composition used was 60% Ti64, 10% ethanol, 10% xylene, 3% PVB, 1% PEG and 16% MEK. Using mylar film as a casting base material gave the best results. The casting mechanism used in the strip casting method was also designed and produced within the scope of this thesis study and put into operation for the production of composites. The lowest wear rate with a value of 0.933×10^{-5} mm³/Nm is seen in the 30-G sample.

After the production of the composites, mechanical tests such as wear resistance and hardness measurement, examination of thermal conductivity behavior and internal structure examinations were carried out. Thus, the effect of the application method of graphene reinforcement and the amount of reinforcement on the properties of the composite material was examined. According to SEM images, a more homogeneous and dense material structure is observed as the pressing pressure increases. Porosity decreased significantly with increasing pressure. The highest hardness value was measured in 0.45% graphene reinforcement with 676.87 HV0.1. According to the thermal conductivity behavior, the sample coded 30-G exhibited the highest thermal conductivity.

As a result of the study, it was revealed that graphene reinforcement had an increasing effect on the thermal conductivity, wear resistance and hardness value of the Ti64 material.

Keywords: Ti64, Graphene, Tape casting method, Metal matrix composites

ÖN SÖZ VE TEŞEKKÜR

Bu doktora çalışmasının her aşamasında bilgi ve deneyimlerini benimle paylaşan, yorucu ve öğretici bu süreçte katkılarını benden hiçbir zaman esirgemeyen çok değerli danışmanım Doç. Dr. Mevlüt GÜRBÜZ'e teşekkürü bir borç bilirim.

Çalışmamın başladığı andan bitişine dek tez izleme süreçlerinde ve desteğe ihtiyaç duyduğum her aşamada değerli bilgileriyle tezimi bir adım öne taşıyan ve tezime anlam katan sayın Doç. Dr. Mahmutcan ŞENEL ve Sayın Dr. Öğr. Üyesi Aydemir Güralp URAL'a çok teşekkür ederim.

Üretim süreçlerinde bana yardımcı olan Walid KATENDE'ye, Makine Mühendisliği Bölümündeki çalışma arkadaşlarıma, Sampa Otomotiv Sanayi ve Ticaret A.Ş. firmasına katkılarından dolayı teşekkür ederim.

Bugün beni bu doktora tezini ortaya çıkaracak eğitim düzeyine sonsuz emekleriyle ulaştıran sevgili aileme, her daim destek ve güven duygusuyla bana güç veren sevgili eşim Cengiz Görkem DENGİZ'e ve yaptığım her şeyin daha büyük anlam kazanmasını sağlayan canım kızım İnci Deniz DENGİZ'e yanımda oldukları için teşekkür ediyorum.

Bu çalışma Ondokuz Mayıs Üniversitesi tarafından PYO.MUH.1901.22.003 proje numarası ile desteklenmiştir. Tez çalışmaları kapsamında, TÜBİTAK 2209-B Üniversite Öğrencileri Sanayiye Yönelik Araştırma Projeleri Desteği Programı tarafından desteklenen iki proje ile çalışmaya finansal destek sağlanmıştır. Aynı zamanda bu projelerde görev alan lisans öğrencilerinin yetiştirilmesi ve lisans düzeyinde bitirme çalışması/tez çalışmalarının ortaya çıkması gerçekleştirilmiştir.

Emine Özlem DENGİZ

İÇİNDEKİLER

TEZ KABUL VE ONAYI	i
BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK BEYANI	ii
TEZ ÇALIŞMASI ÖZGÜNLÜK RAPORU BEYANI	ii
ÖZET	iii
ABSTRACT	iv
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
TABLolar DİZİNİ	ix
1. GİRİŞ	1
1.1. Amaç ve Kapsam	3
1.2. Özgün Değer	3
2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI	5
2.1. Grafen Katkılı Metal Matrisli Kompozitlerin Üretimi	5
2.1.1. Grafen Katkılı Titanyum Matrisli Kompozitler	5
2.1.2. Grafen Katkılı Magnezyum ve Alüminyum Matrisli Kompozitler	7
2.2. Şerit Döküm Yöntemiyle Malzeme Üretimi	13
2.3. Grafen/Grafit Katkılı Metal Matrisli Kompozitlerin Şerit Döküm Yöntemiyle Üretilmesi Üzerine Yapılmış Çalışmalar	22
3. KOMPOZİT MALZEMELER	23
3.1. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması	24
3.1.1. Matris Malzemesinin Cinsine Göre	24
3.1.2. Takviye Elemanın Şekline ve Yerleşimine Göre	26
3.2. Titanyum ve Alaşımları ile Oluşturulmuş Metal Matrisli Kompozitler	27
3.2.1. Ti64 Alaşımı ve Özellikleri	29
3.2.2. Titanyum Metal Matris Kompozitlerin Üretim Yöntemleri	30
4. MATERYAL VE YÖNTEM	38
4.1. Materyal	38
4.1.1. Ti64	38
4.1.2. Grafen	39
4.1.3. Polivinil bütiral (PVB)	40
4.1.4. Polietilen glikol	40
4.1.5. Etanol (EtOH)	41
4.2. Yöntem	43
4.2.1. Şerit Döküm Ünitesi Tasarımı ve Üretimi	46
4.2.2. Şerit Döküm Çamurunun Optimizasyonu	49
4.2.3. Döküm İçin Altlık Malzeme Seçimi	58
4.2.4. Grafen Takviyesinin Optimizasyonu	60
4.2.5. Sprey Uygulaması İçin Çözücü Sıvının Optimizasyonu	61
4.2.6. Kaplama Yapılacak Grafen Miktarının Optimizasyonu	62
4.2.7. Dilimleme İşlemi	64
4.2.8. Katmanlama İşlemi	64
4.2.9. Presleme İşlemi	65
4.2.10. Isıl İşlem Uygulamaları	66
4.2.11. Kırma, Bakalite Alma ve Parlatma İşlemi	68
4.2.12. Sertlik Ölçme İşlemi	68
4.2.13. Aşınma Test İşlemi	69
4.2.14. Termal İletkenlik Ölçme İşlemi	70
4.2.15. Taramalı Elektron Mikroskobu ile Mikroyapı Analizi	73
5. BULGULAR VE TARTIŞMA	75
5.1. Şerit Döküm Ünitesinin Tasarım ve İmalatının Analizi	75

5.2.	Şerit Döküm Çamurunun Optimizasyon Sonuçlarının Analizi.....	75
5.3.	Şerit Döküm Altlık Tabaka Optimizasyon Sonuçlarının İncelenmesi	76
5.4.	Yoğunluk Ölçüm Sonuçlarının Analizi	76
5.5.	Grafen Sprey Kaplama Optimizasyon Sonuçlarının Analizi	78
5.6.	Grafen Takviye Oranının Optimizasyon Sonuçlarının Analizi.....	80
5.7.	Sertlik Ölçüm Sonuçlarının Analizi	80
5.8.	Aşınma Test Sonuçlarının Analizi	82
5.9.	Termal İletkenlik Test Sonuçlarının Analizi	84
5.10.	Mikroyapı Görüntülerinin Analizi	90
6.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	101
	KAYNAKLAR	104
	ÖZGEÇMİŞ.....	111



SİMGELER VE KISALTMALAR

MMK	: Metal Matrisli Kompozit
SMK	: Seramik Matrisli Kompozit
PMK	: Polimer Matrisli Kompozit
TMK	: Titanyum Matrisli Kompozit
GNT	: Grafen Nanonabaka
HSP	: Hegzagonal Sıkı Paket
HMK	: Hacim Merkezli Kübik
IPD	: İndüksiyon Plazma Biriktirme
PVD	: Fiziksel Buhar Biriktirme
KNT	: Karbon Nanotüp
FE	: Fosfat Ester
MBY	: Menhaden Balık Yağı
PE	: Polietilen
PP	: Polipropilen
PVC	: Polivinilklorür
PA	: Poliamid
PS	: Polistiren
NASA	: Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi
TMCTECC	: Titanyum Matrisli Kompozit Türbin Motoru Kompozit Konsorsiyumu
ÇKG	: Çok Katmanlı Grafen
GO	: Grafen Oksit
TKGO	: Tek Katmanlı Grafen Oksit
0-0	: Grafen Katkısı %0, Arayüzey Grafen Kaplamasız Ti64 Kompozit
0-G	: Grafen Katkısı %0, Arayüzey Grafen Kaplamalı Ti64 Kompozit
15-0	: Grafen Katkısı %0,15, Arayüzey Grafen Kaplamasız Ti64 Kompozit
15-G	: Grafen Katkısı %0,15, Arayüzey Grafen Kaplamalı Ti64 Kompozit
30-0	: Grafen Katkısı %0,30, Arayüzey Grafen Kaplamasız Ti64 Kompozit
30-G	: Grafen Katkısı %0,30, Arayüzey Grafen Kaplamalı Ti64 Kompozit
45-0	: Grafen Katkısı %0,45, Arayüzey Grafen Kaplamasız Ti64 Kompozit
45-G	: Grafen Katkısı %0,45, Arayüzey Grafen Kaplamalı Ti64 Kompozit

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.1. Kompozit malzemelerin sınıflandırılması	24
Şekil 3.2. Alfa, beta ve alfa+beta fazındaki bazı titanyum alaşımlarının davranışları (Donachie, 2000).....	28
Şekil 3.3. Vanadyum bileşimine bağlı Ti64 denge diyagramı (Donachie, 2000).....	30
Şekil 3.4. Şerit döküm düzeneği (Ren vd, 2018)	35
Şekil 4.1. Şerit döküm yöntemiyle grafen katkı ve çok katmanlı Ti64 kompozitlerin üretim aşamaları	45
Şekil 4.2. Şerit döküm ünitesi montaj resmi	46
Şekil 4.3. Döküm ünitesi ile koruyucu kapak altında kurumaya bırakılan malzeme	48
Şekil 4.4. Kompozisyon uygulamasına ait malzeme görüntüleri: (a) ilk döküm anındaki numune, (b) kuruma aşamasındaki numune	50
Şekil 4.5. Döküm sonrası kurumaya bırakılan numune yüzeyi görüntüleri: (a) üst görüntü, (b) yan görüntü	52
Şekil 4.6. Kuruma sonrası numuneye ait bir görüntü	53
Şekil 4.7. Döküm sonrası yüzeyde görülen ayrışma	53
Şekil 4.8. Döküm sonrası farklı koşullarda kurumaya bırakılan numunelere ait görüntüler: (a) açık havada kurutma, (b) kapalı alanda kurutma	55
Şekil 4.9. Şerit döküm ile üretilen Ti64 malzemenin kuruma sonrası yüzey görüntüsü	57
Şekil 4.10. Silikon kaplı cam altlık üzerine uygulanmış şerit döküm malzeme	58
Şekil 4.11. WD40 kaplı cam altlık üzerine uygulanmış şerit döküm malzeme	59
Şekil 4.12. Silikonize kağıt üzerine dökülen numune görüntüleri: (a) şerit katmanının elastik yapısı, (b) yüzeydeki homojen olmayan görüntü ve (c) çatlak oluşumu	60
Şekil 4.13. Mylar film altlık üzerinde üretilmiş Ti64 şerit malzeme	60
Şekil 4.14. Sprey kaplama çözeltilerinin katı madde çökelme davranışları	62
Şekil 4.15. Ti64 şerit malzemeler: (a) grafen kaplaması uygulanmış, (b) grafen kaplaması uygulanmamış	63
Şekil 4.16. Kaplama öncesi Ti64 şerit numuneler: (a) dilimlenmiş numuneler, (b) 24'lü dilimden oluşan kaplama setleri	63
Şekil 4.17. Grafen kaplanmış şerit katmanları	64
Şekil 4.18. Dilimlenmiş Ti64 numuneler	64
Şekil 4.19. Katmanlı olarak dizilmiş Ti64 şerit malzeme	65
Şekil 4.20. Dairesel kesitli kalıp	65
Şekil 4.21. Elektro hidrolik pres: (a) genel görünüm, (b) numunenin preslenme aşamasındaki görünümü	66
Şekil 4.22. Farklı basınçlarda preslenen katmanlı Ti64 numuneler: (a) 20 bar, (b) 40 bar, (c) 60 bar ve (d) 80 bar altında preslenenmiş numuneler	66
Şekil 4.23. Grafen takviyeli Ti64 kompozit malzeme üretilimindeki ısıtma işlem prosesi	68
Şekil 4.24. Sertlik ölçüm cihazına ait görüntüler: (a) cihazın genel görünümü, (b) sertlik ölçümü yapılan yüzeyin mikroskopik görüntüsü	69

Şekil 4.25. Aşınma test cihazına ait bir görüntü	69
Şekil 4.26. Dow Corning 340 termal macun	71
Şekil 4.27. TESTO 881 termal kamera	72
Şekil 4.28. Taramalı elektron mikroskobuna ait bir görüntü	73
Şekil 5.1. Pres basıncına karşılık sinterleme öncesi ve sonrası numunelerin yüzde yoğunluk değişimi	77
Şekil 5.2. Pres basıncına karşılık sinterleme öncesi ve sonrası numunelerin yoğunluk değişimi	77
Şekil 5.3. Kaplama süresine karşılık değişen grafen miktarı	79
Şekil 5.4. Pres basıncına karşılık sertlik değerinin değişimi	81
Şekil 5.5. Grafen katkı oranına bağlı olarak değişen sertlik değeri	82
Şekil 5.6. Grafen takviyesine karşılık aşınma oranı grafiği	84
Şekil 5.7. Farklı sıcaklıklarda yapılan termal ölçümler: (a) 50°C, (b) 60°C, (c) 70°C, (d) 80°C, (e) 90°C ve (f) sıcaklık skalası	85
Şekil 5.8. Farklı sıcaklıklarda yapılan termal ölçümler: (a) 100°C, (b) 110°C, (c) 120°C, (d) 130°C, (e) 140°C ve (f) sıcaklık skalası	86
Şekil 5.9. Farklı sıcaklıklarda yapılan termal ölçümler: (a) 150°C, (b) 170°C, (c) 180°C, (d) 190°C, (e) 200°C ve (f) sıcaklık skalası	87
Şekil 5.10. Isıtıcı yüzey sıcaklığı – numune sıcaklığı grafiği	89
Şekil 5.11. Farklı basınçlarda preslenen Ti64 kompozitlerin kırık yüzey görüntüleri: (a) 20 bar, (b) 40 bar, (c) 60 bar ve (d) 80 bar basınç altında preslenen numuneler	91
Şekil 5.12. Ti64 katmanlı kompozite ait görüntüler: (a) EDS görüntüsü, (b) elementel haritalama	92
Şekil 5.13. Ti64 kompozit malzemeye ait görüntüler: (a) SEM, (b) SEM-EDS ve (c-g) elementel dağılım	94
Şekil 5.14. Ti64 kompozitlere ait görüntüler: (a) 30 s, (b) 60 s ve (c) 90 s süre ile grafen kaplaması yapılmış numuneler	94
Şekil 5.15. Ti64 kompozitlere ait SEM görüntüleri; a) 500 kat, b) 100 kat büyütme yapılmış numuneler	95
Şekil 5.16. Ti64 kompozitlere ait kırık yüzey SEM görüntüleri: (a) 0-0, (b) 0-G, (c) 15-0, (d) 15-G, (e) 30-0, (f) 30-G, (g) 45-0 ve (h) 45-G	97
Şekil 5.17. Ti64 kompozitlere ait SEM-EDS ve elementel dağılım görüntüleri: (a-a1) 0-G, 99	
Şekil 5.18. Farklı numunelere ait katmanlar arası ayrışma görüntüleri: (a) 0-G, (b) 15-G, (c) 30-G ve (d) 45-G numuneleri	100

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 2.1. Grafen katkılı titanyum matrisli kompozitler üzerine yapılmış çalışmalar	7
Tablo 2.2. Grafen katkılı diğer metal matrisli kompozitler üzerine yapılmış çalışmalar	12
Tablo 2.3. Şerit döküm yöntemiyle malzeme üretimine yönelik yapılmış çalışmalar	20
Tablo 2.4. Grafen/Grafit katkılı Ti64 metal matrisli kompozitlerin şerit döküm yöntemi ile üretilmesi üzerine yapılmış çalışmalar	22
Tablo 3.1. Parçacık takviyeli titanyum metal matrisli kompozitler için çeşitli takviyelere örnekler	34
Tablo 3.2. Şerit dökümde kullanılan tipik dağıtıcı, bağlayıcı ve plastikleştiriciler.	36
Tablo 4.1. Ti64'ün mekanik özellikleri	38
Tablo 4.2. Grafenin özellikleri	40
Tablo 4.3. Balık yağının kimyasal özellikleri.....	43
Tablo 4.4. Parça numaraları ve açıklamaları	47
Tablo 4.5. Şerit döküm işleminde kullanılan çamur bileşenlerinin ağırlıkça yüzde oranları	49
Tablo 4.6. Ağırlıkça Ti64 ve grafen oranlarına karşılık bileşen kodları	60
Tablo 4.7. Bileşen kodları ve grafen ilave durumu.....	61
Tablo 5.1. Sprey süresine bağlı olarak grafen miktarındaki değişim	78
Tablo 5.2. Aşınma testleri sonucu hesaplanan aşınma oranı değerleri	83
Tablo 5.3. Numune koduna karşılık işaret kodu ve ölçülen sıcaklık değerleri	88

1. GİRİŞ

Günümüzde, birçok farklı kullanım alanı için makine, cihaz, araç-gereç ve parça üretilmektedir. Her ürün, belirli bir kullanım yerine ve kullanım biçimine göre özel özellikler taşımalıdır. Ancak mevcut ana malzemeler, tüm bu özellikleri tek başına sağlayacak yapıda değildir. Geleneksel malzemelerin istenilen tüm özellikleri sağlaması zor olduğundan, daha üstün ve ekonomik malzemelerin üretimi için sürekli bir arayış vardır. Belirli bir uygulama için gereken fiziksel, mekanik ve kimyasal özellikler, genellikle bileşenlerin kombinasyonu ile elde edilir. Bu nedenle, gelişmiş malzemelere olan ihtiyaç arttıkça, kompozit malzemeler daha da önem kazanmaktadır.

Yeni malzemelerin oluşturulması için iki veya daha fazla malzemenin bir araya getirilmesiyle elde edilen malzemelere kompozit malzemeler denir. Bu şekilde, farklı özellikleri bir araya getirerek istenilen özellikleri tek bir malzemeyle sağlamak, yeni özellikler geliştirmek ve daha ekonomik malzemeler üretmek mümkün olur. Kompozit malzemeler genellikle matris ve takviye elemanlarından oluşur. Matris elemanları metal, polimer veya seramik gibi çeşitli malzemelerden olabilir. Kompozit malzemeler, matris malzemesinin türüne göre adlandırılır (metal matrisli kompozitler, polimer matrisli kompozitler ve seramik matrisli kompozitler). Son yıllarda, metal matrisli kompozit (MMK) malzemelerin üretimi ve kullanımı, yüksek elastisite modülü, mukavemet, aşınma dayanımı, yüksek sıcaklık özellikleri gibi üstün fiziksel ve mekanik özelliklerinden dolayı artmıştır. Bu malzemeler özellikle uzay sanayi, havacılık, otomotiv, elektrik ve tıp alanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır.

MMK'lar, bir metal veya metal alaşımının matris malzeme olarak kullanılmasıyla oluşurlar. En yaygın kullanılan metal matris malzemeler titanyum, magnezyum, alüminyumdur. Takviye malzemeler ise partikül, fiber, lamine veya dolgu formunda kullanılan plastik, cam elyaf, seramik, metal, karbon esaslı maddeler gibi farklı özelliklerdeki malzeme gruplarından oluşabilir. MMK'lar için matris malzeme olarak daha çok hafif metaller ve takviye elemanı olarak da genellikle seramik malzemeler seçilmektedir.

Bu çalışmada, titanyum alaşımı olan Ti64 matris metali olarak kullanılacaktır. Titanyum alaşımları, yüksek özgül mukavemet, düşük yoğunluk, yüksek kimyasal direnç ve biyomedikal implantlar için uygun biyouyumluluk gibi özellikler sergiler. Bu özellikler, titanyum alaşımlarını hem havacılık endüstrisinde hem de biyomedikal

uygulamalarda temel yapısal malzeme olarak önemli kılar. (Daudt vd, 2019). Şu anda, Ti64 (a + b-tipi alaşım) en yaygın kullanılan titanyum alaşımıdır (Boyer, 1996; Niinomi, 1998). Ancak bunların yanında düşük termal iletkenliği, ve nispeten düşük mukavemet özellikleri nedeniyle bazı alanlarda kullanımı sınırlı kalmaktadır. Bu nedenle MMK yapılarda matris malzeme olarak kullanılarak üstün özelliklerinden istifade edilmekte ve takviye elemanlarla birlikte istenen diğer fiziksel ve mekanik özellikler de kazandırılmaktadır.

MMK yapılarda takviye elemanı olarak son yıllarda kullanımı yaygınlaşan grafen, sahip olduğu üstün mekanik ve fiziksel özellikler sebebiyle tercih edilmektedir. Özellikle elektriksel ve termal iletkenliğinin çok yüksek olması, elastisite modülünün yüksek olması ve iyi bir katı yağlayıcı özelliği sağlaması gibi nedenler grafeni iyi bir takviye malzemesi konumuna getirmektedir. Özellikle grafen takviyeli kompozit malzeme üretiminin bilimsel ve endüstriyel açıdan önemi çok büyüktür. Literatür incelemesi yapıldığında bu konu ile ilgili oldukça az çalışma bulunmaktadır. Grafen sentezi ilk olarak 2004 yılında gerçekleştirilmiştir. Titanyum ile birlikte kullanılarak kompozit oluşturulmaya ise 2015 yılından sonra başlanmıştır.

Kompozit malzemeler üretim yöntemine göre katı faz yöntemler ve sıvı faz yöntemler olmak üzere iki grupta incelenebilir. Toz metalurjisi ve difüzyon bağı katı faz yöntemler arasında yer alırken, döküm, infiltrasyon ve püskürtme gibi yöntemler ise sıvı faz yöntemler olarak sıralanabilir.

Toz metalurjisi, titanyum alaşımlarının üretimi için potansiyel uygun maliyetli bir yoldur, yüksek malzeme kullanımı ve işlevsel gözeneklilik ayarı ile karmaşık parçaların net şekilli imalatına ilişkin geniş yayılma olanakları sağlar. Bunun yanında aynı zamanda pahalı bir malzeme olan titanyum, kullanıldığı üretimlerde mümkün olduğunca az malzeme kaybı ve kolay üretim yöntemi kullanımı önem arz etmektedir. Toz metalurjisi yöntemine malzeme kayıpları özellikle geleneksel döküm yöntemlerine kıyasla mümkün olan en az seviyeye indirilebilmektedir. Geleneksel döküm yöntemleriyle üretilen malzemelerin döküm sonrası işleme aşamalarına tabi tutulması malzeme kaybına ve işlem uzunluğuna yol açmaktadır. Ancak toz metalurjisi yönteminin de kendi içinde bir takım dezavantajları bulunmaktadır.

Sıvı faz üretim yöntemi olarak nitelendirebileceğimiz şerit döküm yöntemi bu çalışmada kullanılması planlanan üretim tekniğidir. Bu yöntem geleneksel döküm

yöntemleriyle kıyaslandığında yaşanan malzeme kayıplarının en aza indirilmesini sağlamaktadır. Katı faz üretim yöntemlerinin başında gelen toz metalurjisi yöntemi ile kıyaslandığında ise tozların topaklanma eğilimi ve dolayısıyla mekanik özelliklere olumsuz etkisi gibi bazı dezavantajların önüne geçilmesi amaçlanmaktadır.

1.1. Amaç ve Kapsam

Bu doktora tez çalışmasının amacı, şerit döküm yöntemi kullanılarak Ti64 alaşımı ile kompozit malzeme üretilmesi ve karakterizasyon çalışmalarının yapılmasıdır. Titanyum alaşımları biyomedikal ve havacılık alanlarında yaygın olarak kullanılan malzemelerdir. Bu alanlarda kullanılan Ti alaşımlarında malzemelerin hafiflik ve mekanik özelliklerinin iyi olması ön planda tutulmaktadır. Çok katmanlı kompozit malzemeler sergiledikleri yüksek mekanik özellikler nedeniyle yine biyomedikal ve havacılık gibi ağırlık/mechanik özellik oranının önemli olduğu sektörlerde sıklıkla kullanılmaktadır. Bu çalışmada ayrıca;

- Şerit döküm yönteminin kullanılmasıyla en az malzeme kaybına yol açmak,
- Düşük maliyetli ve basit üretim prosesleri içeren yöntem ile üretim maliyetlerinin azaltılması,
- Son talaşlı işlem gibi maliyet kayıplarının ortadan kaldırılması,
- Grafen takviyesinin Ti64'ün mekanik ve fiziksel özelliklerini iyileştirmesi ve tozların topaklanmasının neden olduğu mekanik özelliklere olumsuz etkinin önüne geçilmesi amaçlanmaktadır.

1.2. Özgün Değer

Şerit dökümü, seramik üretiminde sıkça kullanılan bir yöntemdir; ancak metaller için literatürde pek yaygın değildir. Literatürde, bakır, titanyum, magnezyum ve alüminyum gibi metaller için örnekler bulunmakla birlikte, bunlar sayıca sınırlıdır. Metal şerit dökümü genellikle çelik sac üretimiyle sınırlıdır ve genellikle diğer geleneksel biçimlendirme yöntemleriyle yapılır. Şerit dökümü, nano seviyesinden milimetre seviyesine kadar farklı kalınlıklarda sac malzemelerin üretimi için uygun bir yöntem olup, uygulaması kolay ve maliyeti düşüktür. Geleneksel yöntemlerle çok ince metal levhaların üretimi zor olabilir, ancak şerit dökümü ile istenilen incelikte levha üretmek mümkündür. Özellikle titanyum gibi daha az sünek metaller için şerit dökümü, çekici bir üretim yöntemi olabilir. Bu yöntem, çok katmanlı kompozit

malzemelerin hazırlanmasında sıkça kullanılır ve uygulama kolaylığı ve düşük maliyeti nedeniyle oldukça çekicidir.

Titanyum ve titanyum alaşımlarının üstün yapısal özelliklere sahip olmasından dolayı endüstride yaygın olarak kullanılması bu malzemeleri cazip hale getirmektedir. Ayrıca şerit döküm yöntemiyle üretilen malzemelerin istenen mekanik özelliklere sahip olarak, düşük maliyetli şekilde üretilmesi ve bu üretim yönteminin kolaylığı göz önünde bulundurulmuştur. Böylece titanyum alaşımının şerit döküm yöntemiyle üretilmesi ve özellikle biyomedikal malzeme endüstrisinde kullanım alanı bulacak şekilde karakterize edilmesi konusu bu çalışmaya özgünlük kazandırmaktadır.

Literatür incelemesi yapıldığında şerit döküm yöntemi kullanılarak MMK üretimi ile ilgili sınırlı sayıda çalışma bulunduğu saptanmıştır. Özellikle grafen takviyeli Ti-MMK üretimi hakkında herhangi bir yurtiçi veya yurtdışı çalışmaya rastlanmamıştır. Bunun yanında şerit döküm yöntemiyle üretilen kompozit malzemeler literatürde tek katmanlı yapıda çalışılmış, çok katmanlı örneklerle rastlanmamıştır. Burada oluşturulması planlanan kompozit malzemeler çok katmanlı şekilde ve iki farklı formda üretilmektedir. Bunlardan birincisi grafen takviyeli Ti64 malzemenin şerit döküm yöntemi ile dökülüp sonrasında üst üste katmanlar oluşturacak şekilde preslenmesiyle elde edilecek çok katmanlı kompozit yapıdır. İkinci form ise şerit döküm ile üretilen her bir katman arasına belirli oranlarda grafen tozunun sıvı püskürtme yöntemiyle püskürtülerek çok katmanlı yapı oluşturulmasıdır. Oluşturulacak bu iki farklı form arasındaki grafen tabakası farkının fiziksel ve mekanik özelliklere olan etkisi de ayrıca incelenecektir. Ayrıca şerit döküm yöntemiyle üretilen MMK yapıların termal iletkenlikleri üzerine yapılmış bir çalışmaya ulaşılamamıştır. Termal iletkenlik gibi önemli bir fiziksel yapı özelliği, titanyumun sıklıkla kullanıldığı endüstriyel alanlarda oldukça önem arz etmekte ve bu çalışmada termal iletkenliğin iyileştirilmesi amaçlanmaktadır.

2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI

Bu çalışmada üretilmesi amaçlanan grafen esaslı Ti64 metal matrisli kompozit malzemelerin şerit döküm yöntemi ile üretimi için literatür taraması yapılmıştır. Bu kapsamda;

- Grafen katkılı metal matrisli kompozitlerin üretimi
 - Grafen katkılı titanyum matrisli kompozitler
 - Grafen katkılı diğer metal matrisli kompozitler
- Şerit döküm yöntemiyle malzeme üretimi
- Grafen/Grafit katkılı Ti64 matrisli kompozitlerin şerit döküm yöntemiyle üretilmesi

başlıkları altında gruplandırılarak literatür çalışmaları özetlenmiştir.

2.1. Grafen Katkılı Metal Matrisli Kompozitlerin Üretimi

Grafen takviyeli kompozit malzemelere ait literatür çalışmaları incelendiğinde, kullanılan matris metalinin fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklerinde yüksek oranlarda iyileşmeler gözlenmiştir. Katı yağlayıcı özellik gösteren grafenin aynı zamanda tane büyümesini engelleyici şekilde tane sınırlarında konumlanmasından dolayı takviye malzemesi olarak kullanılması uygun görülmüş ve istenen kompozit yapıya ulaşılabilmektedir. Grafen katkılı metal matrisli kompozitler üzerine yapılan çalışmalar titanyum metali ve diğer metaller olarak iki başlık altında incelenmiş ve Tablo 2.1 ile Tablo 2.2’de verilmiştir.

2.1.1. Grafen Katkılı Titanyum Matrisli Kompozitler

Gürbüz vd yaptıkları çalışmada, titanyumun mekanik, termal ve aşınma özelliklerinin iyileştirilmesi için grafen katkılı titanyum kompozitler üretmişlerdir. Bunun için, ağırlıkça %0,15, %0,30, %0,45 ve %0,60 oranlarında grafen katkısı yaptıkları titanium matris ile toz metalurjisi yöntemiyle numune üretmişlerdir. En yüksek aşınma dayanımı, en yüksek çekme dayanımı ve en yüksek basma dayanımı %0,15 grafen içeren kompozit malzemede gözlenmiştir. En yüksek termal iletkenlik ise %0,30 oranında grafen içeren kompozitlerde gözlenmiştir (Gürbüz vd, 2020).

Song vd bu çalışmada, toz metalurjisi tekniğiyle grafen katkılı titanyum metal matrisli kompozit üretmişlerdir. Çok katmanlı grafenin (ÇKG) oranının incelenmesi

için ağırlıkça %0,5 ve %1,5 oranında katkı yapmışlardır. Sertlik değerleri saf Ti, %0,5 ÇKG ve %1,5 ÇKG için sırasıyla; 8,98 GPa, 15,39 GPa ve 14,54 GPa, akma dayanımı değerleri; 473 MPa, 918 MPa ve 800 MPa ve elastisite modülü değerleri; 248,37 GPa, 264,25 GPa ve 255,67 GPa, kesme dayanımı değerleri; 0,108 GPa, 0,467 GPa, 0,330 GPa olarak ölçülmüştür. Aşınma direnci değerleri ise; 21,46 GPa, 24,12 GPa, 22,39 GPa olarak ölçülmüştür (Song vd, 2016).

Hu vd çalışmalarında, toz metalurjisi ve lazer sinterleme yöntemiyle tek katmanlı grafen oksit kaplamalı titanyum malzeme (TKGO-Ti) üretmişlerdir. Grafen oksit etkisinin incelenmesi için ağırlıkça %1, %2,5 ve %5 oranında kaplama uygulamışlardır. Elastisite modülü değeri saf Ti için 125 GPa iken kaplanmış Ti için 200 GPa olarak bulunmuştur. Vickers sertlik değerleri %1 TKGO-Ti için 630 HV, %2,5 TKGO-Ti için 742 HV ve %5 TKGO-Ti için 509 HV olarak ölçülmüştür (Hu vd, 2016).

Mu vd yaptıkları çalışmada, toz metalurjisi ve sıcak haddeme yöntemleri kullanılarak grafen takviyeli titanyum kompozit üretmişlerdir. Ağırlıkça %0,1, %0,05 ve %0,025 oranlarında grafen katkısı yapılmıştır. Akma dayanımı saf Ti , %0,025, %0,05 ve %0,1 grafen içeren kompozitler için sırasıyla; 520 MPa, 603 MPa, 657 MPa ve 817 MPa olarak ölçülmüştür. Çekme dayanımı saf Ti, %0,025, %0,05 ve %0,1 grafen içeren kompozitler için sırasıyla; 575 MPa, 716 MPa, 784 MPa ve 887 MPa olarak ölçülmüştür. Çekme testi uygulandıktan sonra numunelerin uzama miktarları saf Ti, %0,025, %0,05 ve %0,1 grafen içeren kompozitler için sırasıyla; %30, %25, %20, olarak ölçülmüştür (Mu vd, 2017).

Cao vd çalışmasında, toz metalurjisi yöntemiyle ağırlıkça %0,5 grafen takviyeli Ti64 kompozit üretimi yapmışlardır. 150 MPa basınçla 700°C’de sıcak presleme yapılmıştır. Ti64 ve GNT-Ti64 için sırasıyla; elastisite modülü: 109 GPa, 125 GPa, çekme dayanımı: 942 MPa, 1058 MPa, akma dayanımı 850 MPa, 1021 MPa, toplam uzama: %9,4, %9,3 olarak ölçülmüştür (Cao vd, 2017).

Gürbüz ve Mutuk bu çalışmada, titanyumun mekanik özelliklerini geliştirmek amacıyla toz metalurjisi tekniğini kullanarak grafen katkılı titanyum metal matrisli kompozitler üretmiştir. Grafen tozu, titanyum tozuna %0,15, %0,30, %0,45 ve %0,60 ağırlık oranlarında katılarak grafenin mikroyapı ve mekanik özellikler üzerindeki

etkisi araştırılmıştır. Üretilen numunelere farklı sinterleme süreleri ve sıcaklıkları kullanılarak sinterleme parametrelerinin etkisi incelenmiştir. En yüksek yoğunluk değeri %0,15 GNT katkısıyla 4,39 g/cm³ olarak elde edilmiştir. Sertlik değeri 390 HV'den 566 HV'ye yükselmiştir. En iyi sonuçlar, sinterleme sıcaklığının 1100°C ve sinterleme süresinin 120 dakika olduğu durumda elde edilmiştir. (Gürbüz & Mutuk, 2017).

Tablo 2.1. Grafen katkılı titanyum matrisli kompozitler üzerine yapılmış çalışmalar

Başlık/Yazar	Malzeme	Çalışma	Sonuç
Mechanical, wear and thermal behaviors of graphene reinforced titanium composites (Gürbüz vd., 2020)	Ti Grafen	Toz metalurjisiyle grafen katkılı Ti kompozit üretimi. Ti içine %0,15, %0,3, %0,45, %0,6 GNT katkısı	En yüksek aşınma dayanımı, çekme dayanımı ve basma dayanımı %0,15 GNT kompozitte, termal iletkenlik ise %0,3 GNT kompozitte olmuştur.
Microscopic mechanical properties of titanium composites containing multi-layer graphene nanofillers (Song vd., 2016)	Ti Grafen	Toz metalurjisi yöntemi ile grafen katkılı Ti kompozit üretimi. Ti matris içine %0,5 ve %1,5 grafen katkısı.	En yüksek sertlik, akma dayanımı, elastisite modülü, kesme dayanımı ve aşınma direnci %0,5 ÇKG içeren kompozitte medyana gelmiştir.
Laser sintered single layer graphene oxide reinforced titanium matrix nano composites (Hu vd., 2016)	Ti Grafen-oksit	Toz metalurjisi ve lazer sinterlemeyle GO kaplı Ti kompozit üretimi. Ti üzerine %1, %2,5 ve %5 GO kaplama.	Elastisite modülü; saf Ti için 125 GPa, kaplanmış Ti için 200 GPa ölçülmüş, en yüksek sertlik; %2,5 TKGO-Ti kompozitte olmuştur.
Microstructure evolution and superior tensile properties of low content graphene nanoplatelets reinforced pure ti matrix composites (Mu vd., 2017)	Ti Grafen	Toz metalurjisi ve sıcak haddelemeyle grafen katkılı Ti kompozit üretimi. Ti içine %0,1, %0,05, %0,025 grafen katkısı.	Akma dayanımı ve çekme dayanımı en yüksek %0,1 grafen takviyesinde. Çekme testi sonrası yüzde uzama miktarları, artan grafen takviyesiyle azalış göstermiştir.
Reinforcement with graphene nanoflakes in titanium matrix composites (Cao vd., 2017)	Ti6Al4V Grafen	Toz metalurjisiyle %0,5 grafen takviyeli Ti64 kompozit üretimi.	GNT takviyesi ile birlikte Ti64'ün mekanik özelliklerinin tamamında iyileşme görülmüştür.
Effect of process parameters on hardness and microstructure of graphene reinforced titanium composites (Gürbüz vd., 2017)	Ti Grafen	Toz metalurjisi yöntemi ile grafen katkılı Ti kompozit üretimi. Ti içine %0,15, %0,3, %0,45, %0,6 GNT katkısı.	En yüksek yoğunluk %0,15 GNT kompozitte, sertlik 390 HV'dan 566 HV'ye yükselmiştir. Sinterleme parametreleri 1100°C, 120 dk'da en iyi mekanik özellik.

2.1.2. Grafen Katkılı Magnezyum ve Alüminyum Matrisli Kompozitler

Kondoh vd yaptıkları çalışmada, saf magnezyum ve AZ31B magnezyum alaşımı üzerine toz metalurjisi tekniğiyle karbon nano tüp (KNT) kaplayarak mekanik özelliklerini geliştirmiştir. Farklı parçacık boyutlarından KNT malzemeleri kullanılarak preslenen numuneler, 673 Kelvin sıcaklıkta argon gazı ortamında işlem görmüştür. Saf magnezyumun akma gerilmesi 178 MPa iken, KNT kaplanmış Mg

numune ve AZ31B alaşımının akma gerilmesi sırasıyla 253 MPa ve 239 MPa olarak ölçölmüştür (Kondoh vd, 2010).

Qian vd yapılan bu çalışmada, magnezyum metal matrisli kompozit malzeme üreterek, karbon nanotüp (KNT) takviyesinin magnezyumun mikroyapı analizi ve sertlik özellikleri üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Lazer kaplama yöntemiyle ağırlıkça %1,3 oranında KNT içeren magnezyum matrisli kompozitler üretmişlerdir. Farklı lazer güçleri (1200 W ve 1400 W) kullanarak elde edilen sonuçları değerlendirmişlerdir. Saf magnezyumun Vickers sertlik değeri 35,2 HV iken, 1200 W gücüyle üretilen kompozitin sertliği 39,6 HV ve 1400 W gücüyle üretilen kompozitin sertliği ise 36,3 HV olarak ölçölmüştür. KNT'lerin kaynak etkisiyle iç yapıda hücresel birleşim ve genişleme meydana gelmiştir. Ayrıca, nano ölçekli karbon partiköllerinin oluştuğu belirlenmiştir (Qian vd, 2013).

Rashad vd çalışmasında, magnezyum içine toz metalurjisi yöntemiyle ağırlıkça %0,3 oranında grafen ekleyerek kompozit malzeme üretmişlerdir. 170 MPa basınç altında sinterlenen toz karışımı kullanarak Ø30x30 mm boyutlarında silindirik numuneler elde edilmiştir. 550°C'de 3 saat ısıtılma gören numuneler, 400°C'de sıcak ekstrüzyonla 9 mm'lik silindirik numunelere dönüştürölmüştür. Grafen katkısının etkisiyle magnezyumun özelliklerinde iyileşmeler gözlenmiştir. Elastisite modölü 13,2 GPa'dan 14,6 GPa'a, akma dayanımı 187 MPa'dan 197 MPa'a, çekme dayanımı 219 MPa'dan 238 MPa'a ve sertlik değeri ise 57,5 HV'den 68,5 HV'ye yükselmiştir. Hasara uğradığı şekil değiştirme miktarı ise %3,45'ten %3,11±0,4'e düşmüştür (Rashad vd, 2013).

Rashad vd yapılan bir çalışmada, yarı toz metalurjisi yöntemiyle magnezyum tozu içine %1 alüminyum, %1 kalay ve %0,18 grafen ekleyerek kompozit malzeme üretmişlerdir. Toz karışım, 580 MPa basınç altında sıkıştırılarak Ø80x45 mm'lik silindirik numunelere dönüştürölmüştür. Argon gazı atmosferinde 630°C'de 2 saat ısıtılma gören numuneler, 350°C'de sıcak ekstrüzyona tabi tutularak 16 mm'lik numunelere dönüştürölmüştür. Mg-Al-Sn ve Mg-Al-Sn-GNT kompozitleri arasında yapılan karşılaştırmalara göre; akma dayanımı 161 MPa'dan 208 MPa'a, çekme dayanımı 236 MPa'dan 269 MPa'a yükselmiş ve hasara uğrayan şekil değiştirme miktarı %16,7'den %10,9'a düşmüştür (Rashad vd, 2014).

Rashad vd bu çalışmada, toz metalurjisi yöntemiyle magnezyum tozu içine %10 titanyum ve %0,18 grafen ekleyerek kompozit malzeme üretmişlerdir. Toz karışım, 600 MPa basınç altında sıkıştırılarak Ø80x40 mm'lik silindirik numunelere dönüştürülmüştür. Argon gazı atmosferinde 630°C'de 2 saat ısıtılma işlemi gören numuneler, 350°C'de sıcak ekstrüzyona tabi tutularak 16 mm'lik numunelere dönüştürülmüştür. Grafen katkısının etkisini belirlemek amacıyla çeşitli ölçümler yapılmıştır. Sonuçlar, yoğunluğun 1,17 g/cm³'ten 1,84 g/cm³'e, akma dayanımının 131 MPa'dan 160 MPa'a, çekme dayanımının 163 MPa'dan 230 MPa'a ve hasara uğrayan şekil değiştirme miktarının %3,2'den %14'e yükseldiğini göstermiştir (Rashad, Pan, Hu vd, 2015).

Rashad vd bir başka çalışmada, magnezyum alaşımı olan AZ61 içine %3 oranında grafen ekleyerek kompozit malzeme üretmişlerdir. 740°C'deki AZ61 eriyiğine %3 oranında grafen eklenerek karıştırılmış ve 5 dakika boyunca aynı sıcaklıkta bekletilmiştir. Daha sonra silindirik kalıba döküm yöntemiyle istenen ölçülerde silindirik numuneler dökülmüştür. Ø82 mm x 45 mm'lik numuneler daha sonra 350°C'de sıcak ekstrüzyon ile 16 mm'lik çaplarda numunelere dönüştürülmüştür. AZ61 ile AZ61-GNT malzemeleri arasında çeşitli testler yapılmıştır. Sonuçlar, sertlik değerinin 75,7 HV'den 87,5 HV'ye, basma dayanımının 461 MPa'dan 480 MPa'a, çekme dayanımının 300 MPa'dan 335 MPa'a, akma dayanımının (çekme) 184 MPa'dan 232 MPa'a ve akma dayanımının (basma) 170 MPa'dan 226 MPa'a yükseldiğini göstermiştir. Çekme testi sonrası hasara uğrayan şekil değiştirme yüzdesinin %11,5'ten %10,7'ye ve basma testi sonrası hasara uğrayan şekil değiştirme yüzdesinin %16,7'den %15,1'e düştüğü gözlemlenmiştir (Rashad, Pan, Yu vd, 2015).

Rashad vd toz metalurjisi yöntemi kullanarak yaptıkları bu çalışmada magnezyum kompozitleri üretmişlerdir. Bu kompozitler grafen kaplı ve alüminyum katkılıdır. Magnezyumun içine %0,09, %0,18 ve %0,3 oranlarında grafen ve %1 oranında alüminyum eklemişlerdir ve 600 MPa basınç altında presleyerek Ø82x45 mm'lik numuneler elde etmişlerdir. 630°C sıcaklıkta 2 saat ısıtılma işlemi uyguladıktan sonra çeşitli testlerden geçmişlerdir. Elde ettikleri sonuçlara göre, saf magnezyum ile kıyaslandığında; Young modülü %0,3 oranındaki GNT ile 5,98 GPa'dan 13,84 GPa'a, akma dayanımı 119 MPa'dan 178 MPa'a, çekme dayanımı 186 MPa'dan 246 MPa'a ve sertlik değeri 41 HV'den 55 HV'ye çıkmıştır. Tüm mekanik özelliklerin en iyi

sonuca ulaştığı grafen oranının %0,3 olduğu tespit edilmiştir. Numunenin hasara uğradığı şekil değiştirme miktarı saf magnezyumda %9,7 iken, %16,9'e yukselmiştir (Rashad vd, 2016).

Prakash vd yuruttukleri bu çalışmada, magnezyum metal matrisli SiC ve grafit katkılı hibrit malzeme uretmislerdir. Farklı oranlarda magnezyum, silisyum karbur ve grafit kullanarak 110°C'de 1 saat kuruttukları tozu, 150 dev/dk'da 4 saat boyunca bilyalı değirmende karıştırmislardır. Daha sonra hidrolik pres ile 900 MPa basınç altında 10 mm çapında silindirik numuneler uretilmiş ve 550°C sıcaklıkta 1 saat boyunca ısııl işleme tabi tutulmuştur. Sonuç olarak SiC ve grafit katkısının sertlik değerini arttırdığı, yoğunluğun sertlik ile doğru orantılı olarak arttığı gorumuştur (Prakash vd, 2016).

Turan vd, yarı toz metalurjisi metoduyla farklı oranlarda (ağırlıkça %0,1, %0,25 ve %0,5) grafen katkılanırılmış magnezyum kompozitleri uretmislerdir ve bu kompozitlerin sertlik, aşınma ve korozyon direnci uzerine etkisini incelemislerdir. Mg-GNT toz karışımı 50 MPa basınç ile 823°K sıcaklık altında sıcak sinterleme yapılmıştır. Preslemenin ardından aynı sıcaklıkta 1,5 saat boyunca ısııl işlem uygulanmıştır. Saf magnezyumun sertlik değerı 40,2 HV olulurken, %0,5 GNT katkılı kompozit malzemede 48,5 HV ile en yuksek sertlik değerı olulmuştur. Aşınma miktarında grafen katkısının artmasıyla birlikte azalış gozlenmiştir. Yoğunluk değerlerinde grafenin artmasıyla birlikte artış gozlenirken, deneysel değerlerde grafenin artmasıyla birlikte azalma tespit edilmiştir. Korozyon oranı (mm/yıl) %0,1 miktarındaki grafen oranından sonra artış gostermiştir. Korozyon direnci en yuksek olan kompozit malzeme %0,1 oranında grafen içeren malzeme olarak belirlenmiştir (Turan vd, 2017).

Karthick vd yapmış oldukları çalışmada, magnezyumun mekanik ozelliklerini geliştirmek amacıyla alümina (Al_2O_3) ve silisyum karbur (SiC) katkılı hibrit malzeme uretmislerdir. Alümina oranı %5 sabit tutulurken, SiC oranı %0 ile %8 arasında değişmektedir. Toz karışımı 200 MPa basınç altında 30 saniye preslenmiş ve ardından 450°C sıcaklıkta 20 dakika mikrodalga sinterlemesine tabi tutulmuştur. Elde edilen sonuçlara gore, artan SiC oranına bağlı olarak yoğunluk %14,66 artmış ve sertlik değerı %16,47 oranında artmıştır (Karthick vd, 2017).

Gürbüz vd gerçekleştirdikleri çalışmada, alüminyumun mekanik özelliklerini iyileştirmek için toz metalurjisi yöntemiyle grafen katkılı alüminyum metal matrisli kompozit üretmişlerdir. Alüminyum tozuna %0,1, %0,3, %0,5 oranlarında grafen katkısı yapılmış ve grafenin mikroyapıya ve mekanik özelliklere etkisi incelenmiştir. Sinterleme yöntemiyle üretilen numuneler farklı süreler ve sıcaklıklarda çalışılmıştır. En yüksek yoğunluk değeri %0,1 GNT katkısıyla elde edilmiş ve sertlik değeri 38 HV'den 57 HV'ye yükselmiştir. Optimum sonuca ulaşmak için 630°C sıcaklıkta ve 180 dakika süreyle sinterleme yapılmıştır (Gürbüz vd, 2018).

Dasari vd bu çalışmada, alüminyum metal matrisli kompozit üretmek için grafen oksit (GO) katkılı toz metalurjisi yöntemini kullanmışlardır. Tozları soğuk presle şekillendirip ardından sinterleme işlemine tabi tutmuşlardır. Alüminyum tozu içine ağırlıkça %0,05, %0,1 ve %0,2 oranlarında grafen katkısı eklemişlerdir. Bu karışımla 20 mm çapında ve 0,5 mm kalınlığında plakalar üretilmiştir. Plakalar preslenerek şekillendirilmiş ve ardından argon atmosferinde 600°C'de 4 saat boyunca sinterlenmiştir. Üretilen kompozitlerin iç yapısını incelemek için taramalı elektron mikroskobu (scanning electron microscope – SEM), X-ışını kırınımı analizi (X-Ray diffraction analysis – XRD) ve Enerji dağılımı x-ışını analizi (Energy dispersive X-ray – EDX) yöntemleriyle analizler yapılmıştır. Ayrıca, mikrosertlik ölçümleri yapılarak elde edilen sonuçlara göre; %0,05 grafen katkısı için mikrosertlik değerinde %16, %0,1 grafen katkısı için %23 ve %0,2 grafen katkısı için %29 oranında artış gözlemlenmiştir (Dasari vd, 2018).

Yang vd yapmış oldukları çalışmada, alüminyum metal matrisli kompozit malzeme üretmek için döküm yöntemini kullanmışlardır. Alüminyum tozu içine ağırlıkça %0,54 oranında grafen katkısı eklenmiştir. Alüminyum ve GNT tozları bilyalı değirmende öğütülmüş ve ardından ergitilerek basınçlı filtrasyon metoduyla döküm işlemi gerçekleştirilmiştir. Numuneler oda sıcaklığında katılaştıktan sonra 450°C'de sıcak ekstrüzyona tabi tutulmuş ve daha sonra 400°C'de 2 saat süreyle tavlama işlemi yapılmıştır. Ekstrüzyon öncesinde ve sonrasında numunelere çeşitli testler uygulanmıştır. Sonuçlar, sıcak ekstrüzyon öncesinde akma ve çekme dayanımında sırasıyla %116 ve %45'lik bir artış gösterirken, sıcak ekstrüzyon sonrasında bu değerlerin sırasıyla %228 ve %93 olduğunu göstermiştir (Yang vd, 2018).

Tablo 2.2. Grafen katkılı diğer metal matrisli kompozitler üzerine yapılmış çalışmalar

Başlık/Yazar	Malzeme	Çalışma	Sonuç
Microstructural and mechanical analysis of carbon nanotube reinforced magnesium alloy powder composites (Kondoh vd., 2010)	Mg AZ31 KNT	Saf Mg ve AZ31B alaşımı üzerine toz metalurjisiyle KNT kaplama.	Akma gerilmesi değerleri saf Mg, KNT kaplı Mg ve AZ31B için sırasıyla 178 MPa, 253 MPa ve 239 MPa olarak ölçülmüştür.
Effects of CNTs on microstructure and hardness of laser welds of the CNT reinforced magnesium composite, (Qian vd., 2013)	Mg KNT	Lazer kaplama yöntemiyle KNT takviyeli magnezyum kompozit üretimi.	Vickers sertlik değeri KNT ilavesi ve lazer gücünün artışına göre artmış, ancak aşırı artış sonrası düşüş yaşamıştır.
Effect of graphene nanoplatelets (GNTs) addition on strength and ductility of magnesium titanium alloys. (Rashad vd., 2013)	Mg, Ti, GNT	Toz metalurjisiyle Mg içerisine %10 Ti ve %0,18 grafen katkısıyla kompozit üretimi.	Mg-Ti-GNT kompozitinin mekanik özellikleri Mg özelliklerine göre iyileşme göstermiştir.
Powder metallurgy of Mg-1% Al-1% Sn alloy reinforced with low content of graphene nanoplatelets (GNTs) (Rashad vd., 2014)	Mg Al Sn GNT	Toz metalurjisiyle Mg içine %1 Al, %1 Sn ve %0,18 grafen katkısı ile kompozit üretimi.	Mg-Al-Sn-GNT kompozitinin mekanik özellikleri saf Mg özelliklerine göre iyileşmiştir.
Investigation on microstructural, mechanical and electrochemical properties of aluminum composites reinforced with graphene nanoplatelets (Rashad vd., 2015)	Mg, Al, GNT	Toz metalurjisiyle Mg içine %0,09, %0,18 ve %0,3 GNT ve %1 Al katkısıyla kompozit üretimi	Mg-Al-GNT kompozitinin mekanik özellikleri Mg özelliklerine göre iyileşme göstermiştir (en iyi sonuç %0,3 GNT katkısında).
Enhanced tensile properties of magnesium composites reinforced with graphene nanoplatelets (Rashad vd., 2015)	Mg GNT	Toz metalurjisiyle Mg içine %0,3 grafen katkısı ile kompozit üretimi.	Grafen katkısı ile üretilen Mg-GNT kompozit malzemenin saf magnezyuma göre mekanik özelliklerinde iyileşme olmuştur
High temperature mechanical behavior of AZ61 magnesium alloy reinforced with graphene nanoplatelets (Rashad vd., 2016)	AZ61, GNT	AZ61 içine grafen katkısı ile kompozit üretimi.	AZ61-GNT kompozitinin mekanik özellikleri AZ61'in özelliklerine göre iyileşme göstermiştir.
Mechanical and wear behaviour of Mg-SiC-Gr hybrid composites (Prakash vd., 2016)	Mg SiC Grafit	Toz metalurjisiyle Mg matrisli SiC ve grafit katkılı kompozit üretimi.	SiC ve grafit katkısının sertlik değerini ve yoğunluk değerini artırdığı görülmüştür.
The effect of GNTs on wear and corrosion behaviors of pure magnesium (Turan vd., 2017)	Mg, GNT	Toz metalurjisiyle Mg içine %0,1, %0,25 ve %0,5 GNT katkısı ile kompozit üretimi.	En yüksek sertlik %0,5 GNT katkılı malzemede. Aşınma dayanımı GNT artışıyla artmıştır. GNT artışıyla teorik yoğunluk artmış, deneysel yoğunluk azalmıştır. Korozyon direnci GNT artışıyla azalmıştır.
Processing, microstructure and mechanical properties of Al ₂ O ₃ and SiC reinforced magnesium metal matrix hybrid composites (Karthick vd., 2017)	Mg Al ₂ O ₃ SiC	Mg içine Al ₂ O ₃ ve SiC katkısı ile kompozit üretimi.	Artan SiC oranına karşın yoğunluk değeri ve sertlik değeri artmıştır.
The effect of sintering time, temperature, and graphene addition on the hardness and microstructure of aluminum composites (Gürbüz vd., 2018)	Al GNT	Toz metalurjisiyle Al içine %0,1, %0,3, %0,5 grafen katkısı yapılarak kompozit üretimi.	GNT katkısı ile saf Al yoğunluk değeri ve sertlik değeri iyileşmiştir. Sinterleme sıcaklığı 630°C ve süresi 180 dakika iken en iyi sonuç elde edilmiştir.

Mechanical properties of graphene oxide reinforced aluminium matrix composites (Dasari vd., 2018)	Al GO	Toz metalurjisiyle Al içine %0,05, %0,1, %0,2 GO katkısı ile kompozit üretimi	Mikrosertlik değerleri GO katkısının artışıyla doğru orantılı olarak artmıştır.
Microstructure and mechanical properties of graphene nanoplates reinforced pure Al matrix composites prepared by pressure infiltration method (Yang vd., 2018)	Al GNT	Döküm ile Al içine %0,54 grafen katkısıyla kompozit üretimi.	Sıcak ekstrüzyon öncesi akma ve çekme dayanımındaki artış sırasıyla %116 ve %45, sıcak ekstrüzyon sonrası %228 ve %93 olmuştur.

2.2. Şerit Döküm Yöntemiyle Malzeme Üretimi

Şerit döküm yöntemiyle malzeme üretimine yönelik çalışmalar literatürde özellikle seramik malzemeler başta olmak üzere metal malzemelerin ince şeritler formunda üretimi için de kullanılmıştır. Bu kapsamda literatüre girmiş bazı çalışmalar bu bölüm içerisinde incelenmiş ve özet bilgiler Tablo 2.3'te verilmiştir.

Mistler yaptığı bu çalışmada, şerit döküm yöntemi ile demir alüminid (FeAl) ince levhalar üretmiştir. Ağırlıkça %88,13 oranında FeAl ve %11,87 oranında diğer (bağlayıcı, dağıtıcı v.b.) malzemelerden oluşan bir kompozisyon hazırlanmış ve mylar film üzerine döküm yapılmıştır. Bu yöntem ile üretilen levhalar sonrasında haddeleme ve tavlama işlemine tabi tutulmuşlardır. Son aşamada sadece sinterlenen levhalar ile sinterleme sonrası hadde ve tavlama işlemleri uygulanan levhalar kıyaslanmışlardır. Haddeleme ve tavlama işlemi uygulanan levhaların özelliklerinde iyileşmeler görülmüştür. Çekme dayanımı aralığı (MPa) 463-518'den 655-718'e, akma dayanımı aralığı (MPa) 303-310'den 359-386'a, yüzde uzama miktarı aralığı 3,5-4,7'den 4,8-5,5'e ve tane boyutu (μm) aralığı 20-30'dan 16-22'ye değişmiştir (Mistler, 1995).

Lobley vd bu çalışmada, şerit döküm yöntemiyle 1,25 mm, 1 mm, 0,75 mm, 0,5 mm ve 0,25 mm kalınlığında Ti tabakalar üretmiştir. 100°C'de 1 saat ve 420°C'de 1 saat ısıtılma işlemine tabi tutulup soğutulmuştur. Konsolidasyon, 3 saat boyunca 350°C'de bir yanmanın ardından 900°C'de ve 45 MPa'da bir vakumlu sıcak preste 1 saat süreyle gerçekleştirilmiştir. Optimum döküm hızı 0,25 m/s olarak belirlenmiştir. Organik maddelerin uzaklaşma sıcaklığının 185°C-370°C aralığında olduğu belirlenmiştir. Kompozit içindeki fiber dağılımının homojen olduğu görülmüştür (Lobley & Quo, 1998).

Zeng vd yürüttüğü çalışmada, şerit döküm ile üretilen katmanlı alümina-titanyum karbür malzemelerin imalatı yapılmıştır. Cam altlık üzerine şerit döküm

yöntemiyle 200 µm kalınlığında tabakalar dökülmüştür. Vakum altında oda sıcaklığında kurutulmuştur. Katman oluşturma, organik maddelerin uzaklaştırılması, sıcak presleme ve sinterleme sonrası dilimleme işlemi ve analizler yapılmıştır. Pres değeri 50-200 MPa arasındaki değişken değerlerde numune üretilmiş ve yoğunluk ölçümü yapılmıştır. Basınç arttıkça yoğunluk artmıştır. TiC içeriğinin numune yoğunluğuna olan etkisi incelenmiştir. TiC'nin teorik yoğunluğu Al_2O_3 'ün yoğunluğundan daha büyük olmasına rağmen, kompozitin yoğunluğu TiC içeriği arttıkça açıkça azalmıştır. Çünkü TiC parçacıkları Al_2O_3 parçacıklarından daha küçük olduğu için, küçük bir parçacığın toz paketleme yoğunluğu, daha büyük bir parçacığından daha azdır (Zeng vd, 2000).

Jingxian vd yürüttükleri çalışmada, TiO_2 levhaların şerit dökümü için dört farklı karışımdan oluşan ikili solvent üzerine çalışma yapmıştır. Bu dört farklı çözelti karışımı (Etil alkol/metil etil keton, Etil alkol/tolüen, İzopropanol/metil etil keton, İzopropanol/tolüen) ile oluşturulan ve dökülen TiO_2 şeritlerin fiziksel ve mekanik özelliklerinin incelemesi yapılmıştır. EtOH/MEK karışımının en düşük viskozite ve en yüksek dielektrik sabitine sahip olduğu belirlenmiştir. Bu çözücü ile hazırlanan döküm karışımı ile üretilen levhaların pürüzsüz ve düzgün bir yüzey gösterdiği ortaya koyulmuştur. Böylece en uygun karışım olduğu belirlenmiştir. Ayrıca TiO_2 tozlarını en iyi ıslatan çözücünün EtOH olduğu da belirlenmiştir. Son aşama olarak EtOH/MEK çözücü ile döküm sıvısı farklı oranlarda hazırlanmış, silikon kaplı polietilen folyo üzerine şerit döküm işlemi gerçekleştirilmiştir. 10 MPa basınç altında ve 90°C'de organik maddelerin uzaklaştırılması işlemi gerçekleştirilmiştir. 1000°C'deki inert atmosferde sinterleme işlemi yapılmıştır. Ergime sıcaklığının üzerindeki Al eriyiği poroz yapıdaki TiO_2 levhalara sızma yoluyla enjekte edilmiştir. Kimyasal bazı reaksiyonlar sonucu Al_2O_3 ve $TiAl_x$ elde edilmiştir (Jingxian vd, 2004).

Rak vd ortaya koydukları bu çalışmada, şerit döküm yöntemi ile cam altlık üzerine 1 mm kalınlığında Ti matrisli ve TiH_2 takviyeli şerit üretimi yapmıştır. Atmosfer koşullarında 24 saat kurumaya bırakılmış, ardından 60°C'de 1 saat ısıtma işlemi sokulmuştur. Organik maddeler ayrıştırılarak kesme işlemleri gerçekleştirilmiştir. Sinterleme öncesi mikroyapı analizleri gerçekleştirilmiştir. Numuneler 600°C'de 1 saat argon ortamında sinterleme işlemine tabi tutulmuştur. Karışım içerisine ağırlıkça %0,15 oranında eklenen TiH_2 molekülleri 288°C ve daha

düşük sıcaklıklarda vakumda elementlerine ayrışma davranışı göstermiştir. Yapı içinde bulunan TiO_2 tabakası ile tepkimeye girerek Ti ve su buharı oluşumları gözlenmiştir. Sinterleme sonrası gözeneklilik oranı %36,2 olarak ölçülmüştür. Ortalama gözenek boyutu ise 22 μm 'dir. 20°C ile 1000°C arasında ısıl genleşme katsayısı $-8,3 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$ olarak ölçülmüştür (Rak & Walter, 2006).

Zuo gerçekleştirdiği çalışmada, şerit döküm yöntemi ile nanometrik TiO_2 levhaların üretilmesi gerçekleştirmiştir. Polipropilen altlık üzerine şerit döküm yöntemiyle 500 μm kalınlığında tabakalar üretilmiştir. Oda sıcaklığında ve atmosfer şartlarında kurutma işlemi gerçekleştirilmiştir. 500°C'de vakum ortamında bağlayıcı uzaklaştırılmıştır. Spark plazma sinterleme yöntemiyle 35 MPa'da 700°C'de 3 dakika boyunca sinterleme işlemi yapılmıştır. Zetaplus partikül boyutlandırma dağılımı, etanol partiküllerinde ultrasonik olarak işlenen TiO_2 tozunun EtOH/MEK solüsyonunun azeotropik karışımlarında daha iyi dağılım gösterdiğini sergilemiştir. PH 6,8 ile ağırlıkça %0,5 KD-1 içeren TiO_2 çamuru en düşük tortu hacmine ve viskoziteye ulaşır. Çamurların reolojik kalitesi büyük ölçüde TiO_2 konsantrasyonuna bağlıdır. %34 hacme kadar katı içerikli TiO_2 çamurları Newtoniyene yakın bir yerde bulunur. TiO_2 filmler, bileşimin homojenliği, pürüzsüz yüzey, kabarcık ve çatlak içermemesi gibi iyi nitelikler sergiler ve bu da çamur durumunun güvenilir olduğunu gösterir. Filmin (hacimce %34) görünen yoğunluğu ve gözenekliliği sırasıyla 1,6 g/cm^3 ve %12,53'tür. Hacimce %24 ve %34 sinterlenmiş levhanın nispi yoğunluğu sırasıyla %51 ve %69'dur. Sinterlenmiş tabakanın tane boyutu 26,12 nm'dir. Sonuçlar, katı içeriğine sinterleme sıcaklığına ve sinterleme basıncına bağlı olarak yoğunluk artışlarının olduğunu göstermektedir (Zuo vd, 2007).

Rauscher yaptığı çalışmasında, şerit döküm yöntemiyle 350 μm kalınlığında tabakalar üretmiştir. Kesme işlemi yapılmış ve 10 MPa altında 10 dakika 70°C'de laminasyon gerçekleştirilmiştir. N_2 atmosferinde 700°C'de bağlayıcı uzaklaştırma işlemi yapılmıştır. 1000°C, 1100°C, 1150°C, 1250°C, ve 1300°C de 3 saat N_2 atmosferinde sinterleme yapılmıştır. Sinterleme sıcaklığındaki artış, tabaka yoğunluklarını artırmıştır. Lamine çelik saclar için en yüksek sinterlenmiş yoğunluk değerleri 1250°C'de elde edilmiştir. Ancak sinterleme sıcaklığının 1300°C'ye çıkması homojen olmayan yüzeylere ve tabaka eğilmelerine neden olmuştur. Tek katman tabakanın yoğunluğu 7,26 g/cm^3 iken, çok katmanlı tabaka yoğunluğu 7,51 g/cm^3

olarak ölçülmüştür. Sinterleme sıcaklığındaki artışla birlikte çelik saclar üzerindeki gözeneklilik seviyesi azalmıştır. Tek katmanlı ve çok katmanlı numunelerin mikroyapı incelemeleri benzer sonuçlar vermiş ve katman sayısının mikroyapıya etkisinin olmadığı görülmüştür. Katmanlar arasında delaminasyon bulunmamaktadır. Sinterleme sıcaklığının artmasıyla birlikte tane büyümesi artmış ve buna bağlı olarak gözeneklilik azalmıştır. Aşırı sinterleme sonucunda, 1300°C'de sinterlenmiş lamine levhaların mikroyapısında önemli tane büyümesi gözlenmiştir. Tipik bir 316L çeliğinin sertliği 126 HV ile 187 HV arasındadır. 1250°C'de sinterlenmiş numunelerin sertliği 182 HV iken, 1300°C'de sinterlenen numunelerde 280 HV olarak ölçülmüştür. Bu durum, sert ve kırılgan karbür oluşumları ve martensit oluşumuna bağlıdır. Aynı şekilde, tipik bir 316L çeliğinin çekme dayanımı 490 MPa ile 690 MPa arasındadır. Boyuna döküm yönünde ölçülen gerilme mukavemeti 495 MPa ve enine döküm yönünde ölçülen gerilme mukavemeti 475 MPa olarak belirlenmiştir. Elastisite modülü değerlerinin ise sırasıyla 140 GPa ve 139 GPa olduğu görülmüştür. Bu nedenle, mekanik özellikler izotropiktir (Rauscher vd, 2008).

Snel, titanyum oksit, nikel oksit ve titanyum tozu kullanarak yaptığı çalışmada şerit döküm yöntemiyle kompozit malzeme üretmiştir. Toz karışım, aseton eklenerek bilyalı değirmende 8 saat boyunca öğütülmüştür. Daha sonra stearik asit ile hidrofobizasyon işlemine tabi tutulmuştur. Organik maddeler ilave edilerek bilyalı değirmende 10 dakika karıştırılarak karışım hazırlanmıştır. Şerit döküm yöntemiyle döküm işlemi gerçekleştirilmiş ve atmosferde kurumaya bırakılmıştır. Ardından 500°C'de buharlaştırma yapılarak 2 saat boyunca 1350°C'de vakum ortamında sinterleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Hidrofobizasyon işlemi için stearik asit ağırlıkça %0, %0,5, %1, %2, %4 ve %7 oranlarında kullanılmış, en uygun sonuç %2 oranında elde edilmiştir. En iyi özelliklerin elde edildiği viskozite değeri incelenmiş ve %28 oranında toz içeren karışımın en iyi elastik modülü ve gerilme mukavemeti sunduğu gözlemlenmiştir. Artan toz oranıyla birlikte bu özelliklerde azalış görülmüş ve malzeme içerisinde kusurlar olduğu gözlenmiştir. Akışkanın viskozitesi ise 4 Pas olarak ölçülmüştür. XRD analizlerine göre toz karışımında Ti, TiO₂ ve NiO fazları görülmüş, ancak herhangi bir reaksiyona rastlanmamıştır. Sinterlenmiş numunelerin XRD analizine göre TiO, NiTi₂, Ni₃Ti fazları gözlemlense de serbest Ni tespit edilmemiştir. Bu durum, biyomedikal uygulamalar için temel bir gerekliliktir. Kompozitin üç nokta eğilme mukavemeti 121 MPa olarak ölçülmüştür. Bu sonuç da

femur kemiğinin gücüyle karşılaştırılabilir. (Snel vd, 2008).

Corral vd yapmış oldukları çalışmada, magnezyum oksitin şerit döküm ile ince levhalar halinde üretimini yapmışlardır. Bunun için farklı oranlardaki bileşenleri kullanarak MgO döküm kompozisyonu hazırlamışlardır. Dispersan olarak ilk aşamada balıkyağı kullanılmış ancak MgO için iyi bir dağıtıcı özelliği göstermemiştir. Sinterlenmiş levhaların yoğunluklarının MgO'nun teorik yoğunluğunun %47-75'i aralığında olduğu görülmüştür (Corral vd, 2008).

Arunkumar vd çalışmasında, TiO_2 malzemelerin katmanlı üretimini şerit döküm yöntemiyle gerçekleştirdiler. Tabakalar, 250 μm kalınlığında olacak şekilde döküldü ve kuruma öncesinde kesme işlemi yapılmış, ardından tabakaların düzenlenmesi için 80°C'de işlem yapılmıştır. Daha sonra, 1,6 ton/cm² basınçla presleme işlemi gerçekleştirilmiş ve organik maddeler 600°C'de uzaklaştırılmıştır. Sinterleme işlemi için ise 2 saat boyunca 1200°C, 1250°C, 1300°C ve 1350°C sıcaklıklarında işlem yapılmıştır. 24 saat sonunda, ksilen-etanol çözücü sisteminin, metil-etil keton-etanol veya toluen-etanol sistemlerine göre daha iyi bir sedimantasyon yüksekliği sunduğu gözlemlenmiş ve minimum çökme hızını sağladığı tespit edilmiştir. Bu nedenle, bu çalışmada ksilen-etanol çözücü sistemi tercih edilmiştir. Dağıtıcı olarak fosfat ester (FE) ve menhaden balık yağı (MBY) malzemeleri arasında yapılan viskozite ölçümleri, MBY'li çamurların, FE'ye kıyasla daha düşük viskoziteler sergilediğini göstermiştir. Bu nedenle, bu çalışmada dispersan olarak MBY seçilmiştir. Minimum çökme ve viskozite etkisi sağlamak amacıyla %0,1 MBY katkısının uygun olduğu belirlenmiştir. Optimum dispersiyon elde etmek için ksilen-etanol zeotropik çözücü sistemi ile ağırlıkça %1 MBY kombinasyonu kullanılmıştır. MBY, TiO_2 'yi etkili bir şekilde susuz ortamda dağıtarak sterik bir dağıtıcı görevi görmüştür (Arunkumar vd, 2010).

Bidaux bu çalışmasında, şerit döküm yöntemiyle TiH_2 tozu kullanarak şerit malzeme üretmiştir. Karışım 4 saat süre ile bilyalı karıştırmaya tabi tutulmuştur. Şerit döküm yöntemiyle silikon kaplı Mylar folyo üzerine şerit döküm yöntemiyle malzeme uygulanmıştır. Tabakalar kurutulduktan sonra altlık üzerinden soyulmuş ve istenen boyutta kesilmiştir. Numunelerden bağlayıcı madde uzaklaştırılmış ve dehidrojenize edilmiştir. Ardından argon atmosferinde 1000°C'de 1 saat sinterleme işlemine tabi tutulmuştur. Numunelerdeki çekme miktarı, döküm yönünde yaklaşık %18, enine

yönde %15 ve kalınlıkta %17 olmuştur. Taramalı elektron mikroskobu gözlemleri, homojen olarak dağılmış bir gözenekliliği ortaya koymuştur. Gözeneklilik hem geometrik hem de görüntü analizinden yaklaşık %25 olarak tahmin edilmiştir. Kırık yüzey görüntüsü, karışık bir kırılma modunu ortaya çıkarmıştır. Pek çok bölgede kırılma sünek olup, gözlenen çukurlar ve kayma izleri bulunmaktayken, bazı alanlar gevrek kırılma göstermiştir. Optik mikroskopta tane yapısında ikizlenmeler görülmüştür. Çekme testi ile 150 MPa ila 320 MPa aralığındaki çekme dayanımı ve %1'in altında uzamalar ölçülmüştür. Düşük uzamaya rağmen levhalar bükülerek plastik olarak deforme edilebilmektedir. Titanyum hidrit tozu, saf titanyum tozuna kıyasla düşük maliyeti nedeniyle temel malzeme olarak iyi bir adaydır (Bidaux vd, 2011).

Rincon vd yaptıkları çalışmada, grafen oksit içeren alümina/zirkonya süspansiyonlarının şerit döküm yöntemiyle üretimini gerçekleştirdiler. Alümina ve zirkonya tozları ayrı ayrı çözücüler içinde karıştırıldı, bu karışıma hacimce %2 oranında grafen oksit tozu takviye edildi. Mekanik karıştırma işleminden sonra bağlayıcı ve köpük giderici eklenerek karışım tamamlandı. Ardından, Mylar film üzerine katmanlar şerit döküm yöntemiyle döküldü ve oda koşullarında 24 saat kurumaya bırakıldı. Kuruduktan sonra katmanlar dilimlendi. Çalışma kapsamında grafen oksit (GO) katkılı alümina-zirkonya (AZ) ve GO katkısız AZ olmak üzere iki farklı numune üretildi. Optimum dağıtıcı miktarının alümina için ağırlıkça %0,8 ve zirkonya için ağırlıkça %1 olduğu belirlendi. GO için ise dağıtıcıya ihtiyaç olmadığı ve yalnızca su içinde karıştırıldığı gözlemlendi. Süspansiyonların en iyi dağılım durumunu belirlemek için darbeli/düz ultrasonik karıştırma yapıldı ve en iyi dağılım %55 katı madde içeren süspansiyonda elde edildi. Bağlayıcı öncesi ve sonrası akışların incelenmesi sonucunda, AZ süspansiyonunda bağlayıcı ilavesinin viskozitenin azalmasına neden olduğu ancak AZ-GO süspansiyonunda viskozitenin daha az oranda düştüğü görüldü. Şerit döküm yönteminin uygulanmasında GO ilavesinin olumsuz bir etkisinin olmadığı sonucuna varıldı (Rincón vd, 2014).

Ru vd yapılan bu çalışmada, şerit dökümü ile çift gözenekli bakırın üretimini ve mikro yapı, kılcal performans ve gaz geçirgenliği gibi özelliklerinin incelenmesini gerçekleştirmişlerdir. Şerit döküm için hazırlanan kompozisyon içeriği; ağırlıkça %55 bakır, bakırın %10'u kadar polivinil alkol, bakırın %1'i kadar polietilen glikol (PEG),

bakırın %0,5'i kadar $C_8H_{18}O$ gaz giderici, %38,95 deiyonize su şeklindedir. Son aşama olarak %0, %0,5, %1 ve %1,5 oranlarında $C_7H_{10}N_2O_2S$ köpük kullanarak poroz yapı elde etmişlerdir. Köpükleştirici maddenin içeriği ağırlıkça %0'dan ağırlıkça %1,5'e arttıkça, ölçülen gözeneklilik %57,7'den %61,8'e artar ve ardından %55,5'e azalır; pompalama hızıyla temsil edilen kılcal performans 0,06 g/s'den 0,26 g/s'ye yükselir; ve gaz geçirgenliğinin genel eğilimi $1,4 \times 10^{-11} \text{ m}^2$ 'den $4,5 \times 10^{-11} \text{ m}^2$ 'ye yükselmektedir (Ru vd, 2014).

Daudt vd, Ti ve %10 Nb tozları kullanılarak 400 μm kalınlığında malzemelerin şerit döküm yöntemiyle üretimini gerçekleştirmiştir. Dilimleme işleminden sonra, bağlayıcı gazın argon atmosferinde 500°C'de 30 dakika boyunca uzaklaştırılması sağlanmıştır. Ardından, vakum altında 1100°C ila 1300°C arasında 180 dakika süreyle sinterleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Sinterleme sıcaklığının artmasıyla porozitenin azaldığı gözlenmiştir. 1100°C ve 1150°C sıcaklıklarında, Nb parçacıklarının Ti matris içinde tamamen çözünmediği, ancak sinterleme sıcaklığının 1200°C ve 1300°C'ye çıkarılmasıyla tamamen çözündüğü belirlenmiştir (Daudt vd, 2019).

Hackemüller vd yapılan bu çalışmada, küresel şekilli gaz atomize (GA) titanyum tozları ile açısallı şekilli hidrojenasyon-dehidrojenasyon (HDH) titanyum tozlarını kullanarak 300 mikrometre kalınlığında plakaların şerit döküm yöntemiyle üretimini gerçekleştirdi. Numunelerin bağlayıcı gazı uzaklaştırılması için argon atmosferinde 500°C'de 15 mbar basınç altında 30 dakika boyunca ısıtım işlemi uygulandı, ardından vakum altında 800°C, 900°C, 1000°C ve 1200°C'de 2 saat süreyle sinterleme işlemi yapıldı. Endüstriyel açıdan bakıldığında, HDH tozlarının kullanılmasının, gaz atomize tozlara kıyasla daha düşük maliyetli olduğu için tercih edildiği görüldü. Artan sinterleme sıcaklığıyla birlikte plakaların kalınlığının azaldığı gözlemlendi. Belirli bir sinterleme sıcaklığında, Ti-HDH tozlarından oluşan malzemelerin, Ti-GA tozlarından oluşanlardan önemli ölçüde daha yüksek gözeneklilik sergilediği ve artan şerit kalınlığıyla birlikte kalıntı gözenekliliğinin azaldığı belirlendi (Hackemüller vd, 2019).

Ghannadi vd bu çalışmada, şerit döküm yoluyla gözenekli titanyum levha imalatı yapmışlardır. Sıvı/katı konsantrasyonu olarak farklı oranlarda uygulamalar yapılmış, üretilen malzemelerin mikroyapı incelemesi ve su geçirgenliği üzerinde durulmuştur. Altlık olarak mylar film kullanılmış ve levhalar atmosfer koşullarında kurutulmuştur. 500°C'de 2 saat boyunca organik buharlaştırma (2,5°C/dk) ve ardından

600°C-1100°C sıcaklıklar arasında (5°C/dk) 1-3 saat aralıkları boyunca sinterleme işlemi yapılmıştır. En iyi mikroyapı özelliği ve yüzey kalitesi %76 TiO₂ ile %12 PVB ve %12 PEG oranlarında çıkmıştır. Sinterleme sıcaklığının ve sinterleme süresinin artmasıyla birlikte porozitenin arttığı görülmüştür. PVB konsantrasyonunun artışı ise açık gözenekliliği arttırmıştır (Ghannadi vd, 2020).

Tablo 2.3. Şerit döküm yöntemiyle malzeme üretimine yönelik yapılmış çalışmalar

Başlık/Yazar	Malzeme	Çalışma	Sonuç
The principles of tape casting and tape casting applications (Mistler, 1995)	FeAl	Şerit döküm yöntemi, ile demir alüminid (FeAl) ince levhaların üretimi. Haddelme ve tavlama etkisi.	Yalnızca sinterleme işlemi gören levhalara kıyasla sinterleme sonrası haddelme ve tavlama işlemi uygulanan levhaların mekanik özelliklerinde iyileşmeler görülmüştür.
Processing of Ti SiC metal matrix composites by tape casting (Lobley vd., 1998)	Ti	Şerit döküm yöntemi ile Ti tabaka üretimi.	Optimum döküm hızı 0,25m/s ve organik madde uzaklaşma sıcaklığı 185°C-370°C olarak belirlenmiştir. Kompozit içindeki fiber dağılımı homojendir.
Fabrication and properties of tape cast laminated and functionally gradient alumina–titanium carbide materials (Zeng vd., 2000)	TiC Al ₂ O ₃	Şerit döküm yöntemi ile Al ₂ O ₃ katkılı TiC tabaka üretimi.	Pres basıncının artışıyla yoğunluk artmıştır. TiC'nin teorik yoğunluğu Al ₂ O ₃ 'ünkinden büyük olmasına rağmen, kompozitin yoğunluğu TiC arttıkça azalmış.
Binary solvent mixture for tape casting of TiO ₂ sheets (Jingxian vd.,2004)	TiO ₂	TiO ₂ şerit dökümü için solvent çalışması (etanol/MEK, etanol /tolüen, 2-propanol /MEK, toluen /2-propanol)	TiO ₂ tozlarını en iyi ıslatan çözücünün etanol olduğu, etanol/metiletilketon karışımının en düşük viskozite ve en yüksek dielektrik sabitine sahip olduğu, levhaların pürüzsüz ve düzgün bir yüzey gösterdiği ortaya konulmuştur.
Porous titanium foil by tape casting technique (Rak vd., 2006)	Ti TiH ₂	Şerit döküm yöntemi ile %0,15 TiH ₂ katkılı poroz Ti katman üretimi.	TiH ₂ 'nin 288°C ve daha düşük sıcaklıklarda vakumda TiO ₂ ile tepkimeye girerek Ti ve H ₂ O oluşturduğu gözlenmiştir. Sinterleme sonrası porozite %36,2, gözenek boyutu 22 µm'dir.
Forming nanometer TiO ₂ sheets by nonaqueous tape casting (Zuo vd., 2007)	TiO ₂	Şerit döküm yöntemi ile TiO ₂ tabaka üretimi.	%0.5 KD-1 içeren TiO ₂ karışımı (PH 6,8) en az çökeltme ve viskoziteye ulaşır. %34'e kadar katı içerikli TiO ₂ çamurları Newtoniyene yakın bir yerdedir. TiO ₂ filmler, homojen, pürüzsüz yüzey özelliği, kabarcık ve çatlak içermemesi gibi iyi nitelikler sergiler Katı içeriğine sinterleme sıcaklığına ve sinterleme basıncına bağlı olarak yoğunluk artmıştır.
Steel-sheet fabrication by tape casting (Rauscher vd., 2008)	AISI316L	Şerit döküm yöntemiyle ince tabaka üretimi.	Sinterleme sıcaklığının artışı ile tabaka yoğunlukları artmış, porozite azalmış (en yüksek yoğunluk 1250°C'de). Çok katmanlı tabaka yoğunluğu tek katmanlı tabaka yoğunluğundan fazladır. Mekanik özelliklerde iyileşme gözlenmiştir (izotropiktir). 1300°C'de önemli ölçüde tane büyümesi gözlenmiştir.
Tape casting and reaction sintering of titanium–	TiO ₂ NiO	Şerit döküm yöntemi ile TiO ₂ ve NiO	Stearik asit için en uygun sonuç %2'dir. En iyi elastik modülü, gerilme

titanium oxide–nickeloxide mixtures (Snel vd., 2008)	Ti	katkılı Ti kompozit üretimi. Hidrofobizasyon işlemi için %0, %0,5, %1, %2, %4, %7 stearik asit kullanımı.	mukavemeti ve viskozite değeri %28 katı içeren karışımdır. Artan toz oranı için bu özelliklerde azalış olmuş ve malzeme içerisinde kusurlar oluşmuştur. Tozda Ti, TiO ₂ ve NiO fazları görülmüş, herhangi bir reaksiyona rastlanmamıştır. Isıl işlem sonrası TiO, NiTi ₂ , Ni ₃ Ti fazları yoktur. Biyomedikal uygulamalar için uygun bir malzemedir, femur kemiğinin gücüyle karşılaştırılabilir.
Tape casting of magnesium oxide (Corral vd., 2008)	MgO	Şerit döküm yöntemi ile MgO levha üretimi.	Sinterlenmiş levhaların yoğunlukları teorik yoğunluğun %47-75'i kadar olduğu görülmüştür.
Dispersion and rheological characterization of TiO ₂ tape casting slurry (Arunkumar vd., 2010)	TiO ₂	Şerit döküm yöntemiyle katmanlı TiO ₂ üretimi ve çözücü sistemlerinin optimizasyonu.	Ksilen-etanol (50:50) çözücü sistemi, metil etil keton-etanol veya toluen-etanol sisteminden daha iyidir (en az çökeltme hızı). Dağıtıcı olarak MBY kullanımı, FE kullanımına kıyasla düşük viskozite meydana getirir (en az çökeltme ve en düşük viskozite %0,1 MBY ilavesinde).
Tape casting of porous titanium thin sheets from titanium hydride (Bidaux vd., 2011)	TiH ₂	Şerit döküm yöntemi ile poroz Ti tabaka üretimi.	Homojen dağılmış ve %25 oranında bir gözeneklilik vardır. Kırık yüzey görüntüsü, karışık bir kırılma modunu ortaya koymuş, pek çok bölgede kırılma sünük iken bazı alanlar gevrek kırılma göstermiş. Tane yapısında ikizlenmeler görülmüştür. TiH ₂ düşük maliyeti bakımından tercih edilebilir.
Tape casting of alumina/zirconia suspensions containing graphene oxide, (Rincón vd., 2014)	Al ₂ O ₃ , Y ₂ O ₃ katkılı ZrO ₂ GO	Şerit döküm yöntemi ile 95:5 oranında Al ₂ O ₃ /ZrO ₂ ve hacimce %2 GO takviyesiyle kompozit üretimi.	Optimum dağıtıcı miktarı, Al ₂ O ₃ , ZrO ₂ ve GO için %0,8 ve %1,0 ve %0 olmuştur. En iyi dağılım gösteren karıştırma türü 0,5 döngü/s lik darbeli moddur. En iyi sonuç veren %55'lik katı madde içeren karışımdır. AZ süspansiyonu için bağlayıcı ilavesi viskoziteyi azaltmış, AZGO süspansiyonuna bağlayıcı ilavesi viskoziteyi daha az düşürmüştür. GO ilavesinin olumsuz bir etkisi olmamıştır
Microstructure, capillary performance and gas permeability of biporous copper fabricated by tape casting (Ru vd., 2014)	Cu	Şerit döküm yöntemi ile %0,5, %1, %1,5 köpükleştirici ilavesiyle gözenekli Cu levha üretimi.	Köpük oluşturuucu madde içeriği ağırlıkça %0'dan ağırlıkça %1,5'e arttığında gözeneklilik bir noktaya kadar artış ve ardından düşüş gösterirken, kılcal performans ve gaz geçirgenliği artmıştır.
Manufacturing of Ti-10Nb based metal sheets by tape casting (Daudt vd., 2019)	Ti Nb	Şerit döküm yöntemiyle %10 Nb katkılı Ti kompozit üretimi.	Sinterleme sıcaklığının artışı poroziteyi azaltmıştır. 1100°C ve 1150°C'de Ti matris içinde Nb tamamen çözünmezken, 1200°C ve 1300°C'de çözünmüştür.
Manufacturing of large-scale titanium-based porous transport layers for polymer electrolyte membrane electrolysis by tape casting (Hackemüller vd., 2019)	Ti-(GA) Ti-(HDH)	Şerit döküm yöntemi ile (GA)-Ti ve (HDH)-Ti plaka üretimi	HDH-Ti uygulaması daha ekonomiktir. Artan sinterleme sıcaklığı ile kalınlık azalmıştır. Ti-HDH malzemeler Ti-GA malzemededen önemli ölçüde yüksek porozite sergilemiştir. Şerit kalınlığı arttıkça kalıntı porozite azalmış.
Fabrication of porous titania sheet via tape casting: Microstructure and water permeability study (Ghannadi vd., 2020)	TiO ₂	Şerit döküm yöntemi ile gözenekli titanyum katman üretimi.	PEG oranlarında çıkmıştır. Sinterleme sıcaklığının ve sinterleme süresinin artmasıyla birlikte porozitenin arttığı görülmüştür. PVB konsantrasyonunun artışı ise açık gözenekliliği arttırmıştır.

2.3. Grafen/Grafit Katkılı Metal Matrisli Kompozitlerin Şerit Döküm Yöntemiyle Üretilmesi Üzerine Yapılmış Çalışmalar

Grafen takviyesi yapılarak şerit döküm yöntemiyle metal matrisli kompozit malzeme üretimine yönelik çalışmaya literatürde rastlanmamış ancak nicelik olarak az da olsa grafit takviyesi ile yapılan çalışma mevcuttur. Bu bölümde ilgili çalışmaların detaylarına yer verilmiş ve Tablo 2.4'te gösterilmiştir.

Cans vd yaptıkları bu çalışmada, grafit takviyeli bakır alaşımlarının şerit döküm yöntemiyle üretilmesi ve tribolojik özelliklerinin araştırılması üzerine çalıştılar. İki farklı kombinasyon olan Cu/grafit ve Cu/MoS₂ için çalışmalar yürüttüler ve bu iki takviye maddesini karşılaştırdılar. Araştırma sonuçlarına göre, grafitin katı yağlayıcı özelliği ve homojen dağılımı, kompozit malzemenin iyi tribolojik özellikler göstermesini sağladı. Ayrıca, altlık malzeme ile kaplama malzemesi arasında sıcak presleme ile iyi bir yapışma sağlandı ve kaplama ile altlık arasında difüzyon gözlemlendi. Grafit katkısının tribolojik özellikleri iyileştirdiği belirlendi; %15'lik grafit katkısı, saf bakıra göre sürtünme katsayısını yarıya indirdi ve aşınma direncinde artış sağladı. Saf bakıra göre, Cu-grafit malzemelerin kütle kaybı yaklaşık %10 iken, Cu-MoS₂ kompozit malzemelerde benzer sonuçlar elde edildi (Cans vd, 2008).

Tablo 2.4. Grafen/Grafit katkılı Ti64 metal matrisli kompozitlerin şerit döküm yöntemi ile üretilmesi üzerine yapılmış çalışmalar

Başlık/Yazar	Malzeme	Çalışma	Sonuç
Tape Casting of Copper Alloys for Tribological Applications (Cans vd., 2008)	Cu, Grafit, MoS ₂	Cu+grafit ve Cu+MoS ₂ kombinasyonları ile şerit döküm yöntemiyle kompozit üretimi.	Grafit katkısı tribolojik özelliklerin iyileşmesini sağlamıştır. Cu+MoS ₂ kompozitlerinde Cu+grafit ile çok yaklaşık sonuçlar gözlenmiştir.

3. KOMPOZİT MALZEMELER

Geleneksel malzemelerle arzu edilen mukavemet, sertlik, tokluk ve yoğunluk kombinasyonunu elde etmek çoğu zaman sınırlıdır. Modern teknolojilerin giderek artan talebinin karşılanması açısından, bazı ihtiyaçları karşılamak amacıyla geleneksel malzemelerin yerini almak üzere daha gelişmiş özelliklere sahip yeni tip malzemelere gereksinim duyulmaktadır. Bu amaçla geliştirilen kompozit malzemeler son yıllarda ilgi çekici ve umut verici olmuşlardır. Kompozitler, takviyesiz alaşımlara kıyasla önemli ölçüde geliştirilmiş özelliklere sahiptir. Havacılık, otomobil, elektronik vb. alanlardaki çeşitli uygulamalarda daha iyi özelliklere sahip, düşük maliyetli, hafif, daha az yoğunluklu bileşenlere sahip malzemelere talep yüksektir (Venkatesh vd, 2023).

Kompozit malzemeler, iki veya daha fazla malzemenin bir araya getirilmesiyle oluşturulmuş üstün özellikli malzemelerdir. Kompozit malzemeyi oluşturan unsurlar, matris eleman ve takviye elemanlardır. Bir kompozit yapı, kendini oluşturan matris elemanın yapısal özelliklerinden daha iyi özellikler sunması amacıyla takviye elemanlarla güçlendirilerek oluşturulur.

Kompozit malzemelerin öncelikli olarak tercih edilmesini sağlayan birtakım avantajlar bulunmaktadır. Bu avantajlar;

- İyi derecede mukavemet özelliği sergilemesi,
- Sertlik ve aşınma dayanımlarının yüksek olması,
- Korozyon dayanımının yüksek olması,
- İstenen seviyede elektriksel iletkenlik ve ısı iletkenlik özelliği,
- Kolay şekillendirilebilir olma,
- Kaplama kolaylığına sahip olma

şeklinde sıralanabilir.

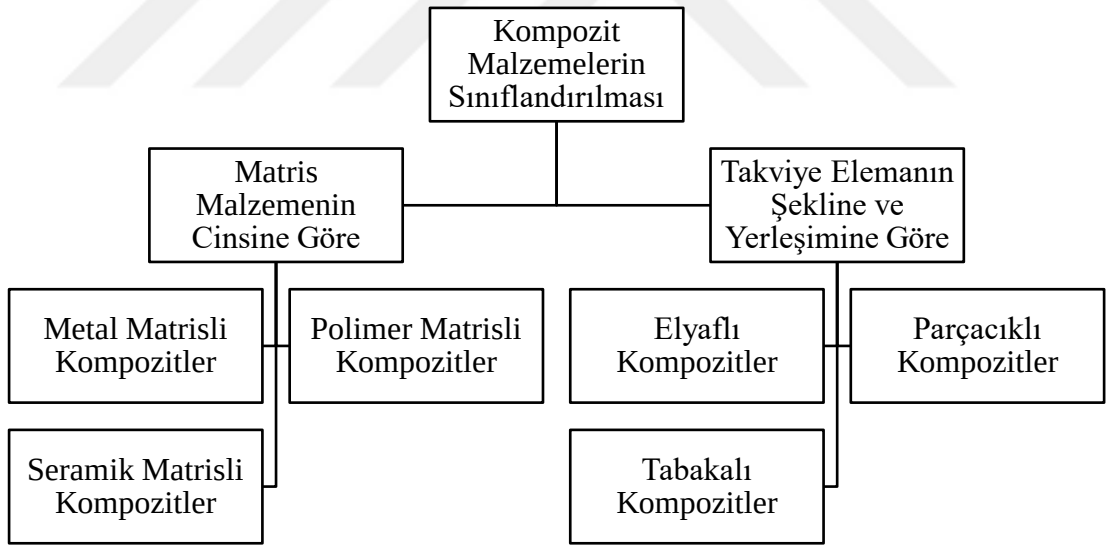
Her ne kadar sahip olduğu üstün özellikler bakımından tercih edilebilir olsalar da, kompozit malzemelerin bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Bunlardan bazıları aşağıda verilmiştir.

- Katmanlı malzemelerin kalınlığındaki değişime bağlı olarak her zaman aynı özelliklerin sağlanması mümkün değildir.

- Üretim yöntemlerine göre, farklı kalite standartlarında ürün elde etmek mümkündür.
- Hasar durumunda, bazı onarım işlemleri zorluklarla karşılaşabilir.
- Hassas bir üretim süreci gerektiğinden, bazı zorluklarla karşılaşılabilir.
- Yeni gelişen bir teknoloji olması nedeniyle, üretici ve kullanıcılar deneyimsizlikle karşılaşabilir.
- Malzemelerin geri dönüşümü oldukça zor olabilir.

3.1. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Kompozit malzemeler, matris malzemesinin türüne ve takviye elemanının şekline ve yerleşimine bağlı olarak iki kategori altında incelenebilir. Matris malzemesinin türüne göre, metal matrisli kompozitler (MMK), polimer matrisli kompozitler (PMK) ve seramik matrisli kompozitler (SMK) olarak sınıflandırılırlar. Takviye elemanının şekline ve yerleşimine bağlı olarak ise, elyafli, parçacıklı ve tabakalı kompozitler olarak ayrılırlar. (Şekil 3.1).



Şekil 3.1. Kompozit malzemelerin sınıflandırılması

3.1.1. Matris Malzemesinin Cinsine Göre

3.1.1.1. Metal Matrisli Kompozitler

Temel olarak metal malzemeyle takviye malzemesinin bir araya getirilmesiyle oluşturulan kompozit malzemeler, çeşitli endüstriyel alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle geleneksel metal malzemelerin yetersiz kaldığı durumlarda

tercih edilen metal matrisli kompozitler, genellikle hafif metallerin matris malzemesi olarak ve seramik malzemelerin takviye elemanı olarak kullanılır. Bu kompozitler, alüminyum, magnezyum, titanyum gibi matris metalleriyle ve Al_2O_3 , SiC, SiN, B_4C , karbon, TiC gibi takviye elemanlarıyla oluşturulur. MMK'lar geniş bir kullanım alanına sahiptir; uzay sanayisinden otomotive, elektrik endüstrisinden tıp alanına kadar pek çok alanda kullanılmaktadır.

Metal matrisli kompozitlerin istenen özelliklere sahip olması, kullanım koşullarına ve amaca bağlı olarak doğru takviye elemanının seçilmesini gerektirir. Ayrıca, üretim yöntemine uygun malzeme seçimi de kritik öneme sahiptir. MMK'ların başlıca takviye elemanları, yüksek sıcaklık dayanımı, aşınma direnci, sertlik ve rijitlik gibi üstün özelliklerinden dolayı tercih edilmektedir.

Matris metalinin takviye elemanını iyi ıslatabilmesi ve etkili bir bağlanma sağlaması önemlidir. Matris ve takviye elemanları arasında kimyasal reaksiyon oluşmamalıdır. Seramikler, yüksek elastik modül, yüksek aşınma direnci ve yüksek sertlik gibi özellikleriyle metal matrisli kompozitlerde kullanıldığında matris metaline güç ve dayanıklılık kazandırır. Sonuç olarak, metal matrisli kompozitler, takviyesiz malzemelere kıyasla daha yüksek mukavemet, ısı ve elektrik iletimi, düşük maliyet, ince yapılı olma ve yüksek aşınma direnci gibi gelişmiş özellikler sunar.

3.1.1.2. Seramik Matrisli Kompozitler

Matris malzemesi seramik olan ve takviye elemanı olarak polimer veya metal gibi malzemelerin kullanıldığı kompozit yapılardır. Seramik matrisli kompozitlerin yapımında yaygın olarak gelişmiş veya yüksek performanslı seramikler kullanılır. Bu yüksek performanslı seramiklerin örnekleri arasında silikon, alüminyum, titanyum ve zirkonyumun oksitleri, nitrürleri ve karbürleri bulunur. Bu gelişmiş seramiklerin önemli bir özelliği ısıya, kimyasallara, aşınmaya ve yıpranmaya karşı alışılmadık derecede yüksek dirençleridir. Ancak bu özellikler, bunların basit ve ekonomik bir şekilde imal edilmesini zorlaştırmaktadır. Bununla birlikte, çekme ve darbe yüklemesi altında çok iyi değildirler ve metallerden farklı olarak herhangi bir esneklik göstermezler ve mekanik veya termal yükleme (termal şok) altında kalıcı deformasyonlara eğilimlidirler. Bu özelliklerinin azaltılması ve daha yüksek mekanik özellikler kazandırılması amacıyla yapılan takviyeler ile seramik matrisli kompozitler üretilerek uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır (Chawla, 1993).

3.1.1.3. Polimer Matrisli Kompozitler

Matris malzeme olan polimerin mukavemetini, sertliğini, ısı direncini, tokluğunu geliştirmek, yüzeyin performansını ve görünümünü iyileştirmek, matris malzemeye iletkenlik, ısı transferi, manyetik, endotermik, emici özellikler gibi spesifik özellikler kazandıran takviye maddelerin eklenmesiyle oluşturulmuş yapılara polimer matrisli kompozitler denir.

Polimer matrisli kompozit malzemeler içerisinde, termoset reçine bazlı kompozit malzemeler ve termoplastik reçine bazlı kompozit malzemelerin yanı sıra, tek bileşenli polimer matrisli kompozit malzemeler ve polimer karışımli matris kompozit malzemeler de bulunmaktadır (Wang vd, 2011).

Termosetler, ısıtıldıklarında kalıcı bir şekilde katılaşırlar ve tekrar ısıtılarak yeniden şekillendirilemezler. Genellikle daha sert ve kırılğandır. Polyester, epoksi, yüksek sıcaklık reçineleri, silikon, poliamid, poliüretan gibi çeşitli türleri bulunmaktadır.

Termoplastikler ise ısıtıldıklarında yumuşarlar ve akışkan hale gelirler, soğuduklarında ise yeniden sertleşirler ve katılaşırlar. Bu özellik, termoplastiklerin tekrar tekrar şekillendirilebilir olmasını sağlar. Şekillendirme sırasında kimyasal olarak değişmezler. Polietilen (PE), polipropilen (PP), polivinilklorür (PVC), poliamid (PA), polistiren (PS) gibi çeşitli türleri bulunmaktadır (Ay, 2017).

3.1.2. Takviye Elemanın Şekline ve Yerleşimine Göre

3.1.2.1. Elyaf (Fiber) Takviyeli Kompozitler

Fiberle güçlendirilmiş kompozitler, bağlantı matrislerine gömülü olarak eksenel şekilde yerleştirilmiş parçacıklar ile oluşturulmuş kompozitlerdir. Fiber takviyeli kompozitlerin temel amacı, daha yüksek elastik modül ile birlikte yüksek mukavemete sahip malzemeler elde etmektir. Mukavemet artışı, matristen fiberlere uygulanan yükten, fiber-matris arasındaki arayüzey bağından ve fiberin genel malzeme doğasından etkilenir. Liflerin hizalanması, sürekli veya rastgele olabilir. Fiber takviyesinin ve matrisin seçimi aynı zamanda uygulama gereksinimlerine de bağlıdır. Son yıllarda kompozit teknolojisinin gelişmesi, ileri düzeyde gelişmiş malzeme davranışlarını elde etmek için farklı üretim metodolojileri kullanarak farklı fiber takviyeli kompozit sistemlerinin geliştirilmesine yol açmıştır (Prashanth vd, 2017).

3.1.2.2. Parçacıklı Kompozitler

Parçacık takviyeleri, metal veya seramik bazlı matrislerin özelliklerini geliştirmek ve güçlendirmek için kullanılan metalik ve seramik malzemelerin mikro veya nano boyutlu bileşenleridir. Parçacıklar kompozitlerin yapısını, ara yüzeyini, mekanik ve tribolojik özelliklerini etkiler. Kompozitlerin üretim tekniği ve tipi de partikül tipine bağlıdır. Tipik olarak metalik; nikel (Ni), niyobyum (Nb), demir (Fe) ve seramik; silisyum karbür (SiC), alümina (Al₂O₃), titanyum karbür (TiC) parçacıklar kompozit takviyesi olarak literatüre geçmiştir.

Lifler, pullar ve elyaflar seramik ve metal matrisleri güçlendirebilse de, toz metalurjisi (TM) tekniklerinin gelişmesi nedeniyle son yıllarda parçacık takviyeleri ilgi görmüştür. Farklı boyut, şekil, morfoloji ve kimyasal bileşime sahip parçacıklar, bu tekniği kullanarak matris elemanı etkili bir şekilde güçlendirebilir ve iyi mikroyapısal özelliklere ve gelişmiş özelliklere sahip kompozit malzemeler üretebilir (Bauri & Yadav, 2017).

3.1.2.3. Tabakalı Kompozitler

Çok katmanlı kompozitlere genellikle laminatlar (tabakalı kompozitler) denir. Bir lamina, bir matris malzemesi içinde asılı duran tek yönlü (veya dokunmuş) liflerin düz (veya bazen kavisli) bir düzenlemesidir. Bir tabakanın genellikle ortotropik olduğu varsayılır ve kalınlığı yapıldığı malzemeye bağlıdır. Bir tabaka tipik olarak kalınlık boyunca tek bir fiber katmanına sahiptir.

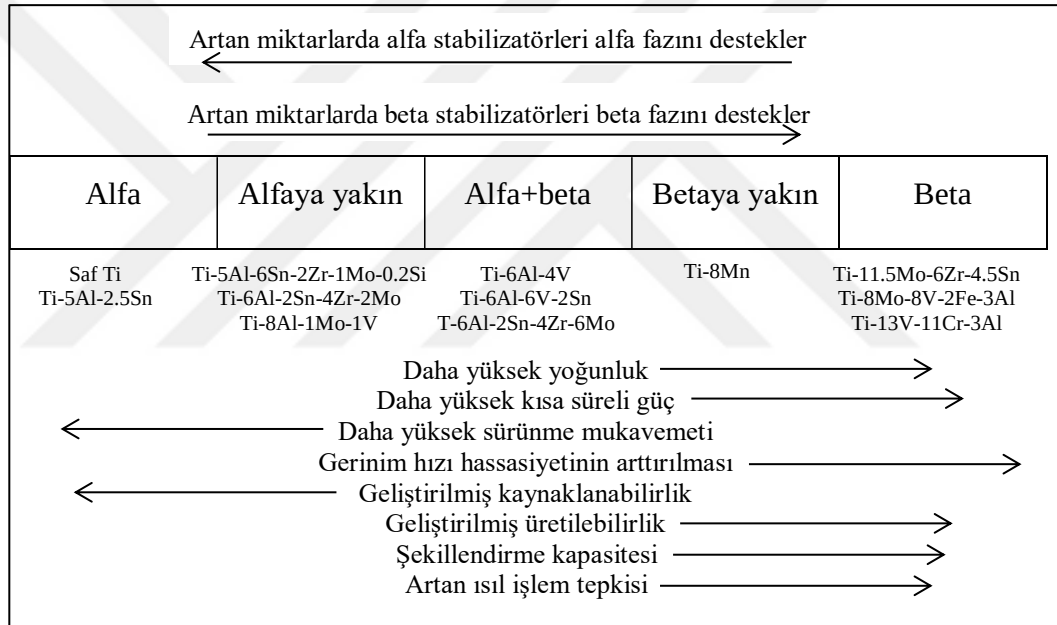
Bir laminat, istenen sonucu elde etmek için özel bir şekilde yönlendirilmiş bir tabaka yığındır. Bireysel tabakalar (laminalar), kullanılan malzeme sistemine bağlı olan bir kurlama prosedürü ile birbirine bağlanır. Bir laminatın mekanik tepkisi, onu oluşturan tekil katmanlarından farklıdır. Laminatın tepkisi, her bir tabakanın özelliklerine ve aynı zamanda tabakaların istiflenme sırasına bağlıdır (Staab, 2015).

3.2. Titanyum ve Alaşımları ile Oluşturulmuş Metal Matrisli Kompozitler

Titanyum, alaşımlama ve deformasyon işlemleriyle büyük ölçüde güçlendirilebilen düşük yoğunluklu bir elementtir (çelik ve süper alaşımların yoğunluğunun yaklaşık %60'ı). Titanyum manyetik değildir ve iyi ısı transfer özelliklerine sahiptir. Termal genleşme katsayısı çeliğinkinden biraz daha düşüktür ve alüminyumunkinin yarısından azdır. Titanyum ve alaşımlarının erime noktaları çeliklerinkinden daha yüksektir, ancak yapısal uygulamalar için maksimum yararlı

sıcaklıklar genellikle bileşime bağlı olarak 427°C kadar düşük bir değerden yaklaşık 538°C ila 595°C aralığına kadar değişir. Titanyum alüminid alaşımları, 760°C'ye kadar sıcaklıklardaki uygulamalar için umut vericidir.

Diğer birçok metal gibi titanyum da değişik şekillerde kristal yapılara sahip olabilir. Saf titanyum ve titanyum alaşımlarının önemli bir bölümü, düşük sıcaklıkta hegzagonal sıkı paket (HSP) yapıya sahip olup, α titanyum olarak adlandırılırlar. Yüksek sıcaklıklarda ise hacim merkezli kübik (HMK) yapı daha karalıdır ve β titanyum olarak adlandırılırlar. Alfa-beta alaşımları uygun şekilde işlendiğinde mükemmel bir mukavemet ve süneklik kombinasyonuna sahiptir. Alfa veya beta alaşımlarından daha güçlüdürler. Şekil 3.2'de alfa, beta ve alfa+beta fazındaki titanyum alaşımlarının davranışları gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Alfa, beta ve alfa+beta fazındaki bazı titanyum alaşımlarının davranışları (Donachie, 2000)

Alaşımlar elementleri genel olarak alfa stabilizatörleri veya beta stabilizatörleri olarak sınıflandırılabilir. Alüminyum, oksijen ve nitrojen gibi alfa stabilizatörleri, alfa fazının stabil olduğu sıcaklığı artırır. Öte yandan vanadyum ve molibden gibi beta stabilizatörleri, beta fazının daha düşük sıcaklıklarda stabilitesine neden olur.

Titanyum alaşımları düşük yoğunlukları, yüksek mukavemetleri, mükemmel korozyon dirençleri ve biyouyumlulukları sayesinde havacılık, otomotiv, denizcilik ve

biyomedikal alanlarında yapısal malzeme olarak yaygın şekilde kullanılmaktadır (Bignon vd, 2019; Lütjering & Williams, 2007; Selva vd, 2021).

Bununla birlikte, düşük sertlikleri, zayıf aşınma dirençleri ve yüksek sıcaklıktaki performanslarının düşük olması nedeniyle, bazı mekanik parçalar için uygulamaları sınırlıdır (Weng vd, 2020; B. Zhang vd, 2020).

Titanyum alaşımlarının mekanik özelliklerini geliştirmek için literatürde titanyum matrisli kompozitler üzerine yapılan bir çok çalışma bulunmaktadır (Peters vd, 2003; Ren vd, 2023; Singh vd, 2019).

Seramik parçacıklarla güçlendirilmiş titanyum matrisli kompozitler daha yüksek sertlik, yüksek sıcaklık özellikleri ve aşınma dayanımı sunar ve bu da araştırmacıların büyük ilgisini çekmiştir (Cao vd, 2023; Huang vd, 2023; Shalnova vd, 2022).

Titanyum matrisli kompozitlerin (TMK) yüksek performanslı uygulamalara dahil edilmesi, imalat karmaşıklığı ve yüksek malzeme ve uygulama maliyetleri nedeniyle çoğu zaman kolay olmamıştır. Ancak literatürde bu malzemelerin kullanımını yaygınlaştırmak amacıyla birçok çaba ve sermaye ortaya koyulmuştur. TMK araştırmalarının ilk günlerinde, özellikle Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi (NASA) tarafından, endüstriyel uygulamalarda kullanımını artırmak için tutarlı çabalar sarf edilmiştir. Diğer büyük girişim örenği ise; Titanyum Matrisli Kompozit Türbin Motoru Kompozit Konsorsiyumu (TMCTECC) programının oluşumu, altı ABD şirketinin TMK'ların büyük gaz türbini motorlarına uygulanması ve geliştirilmesi için güçlerini birleştirmesidir (Singerman & Jackson, 2012).

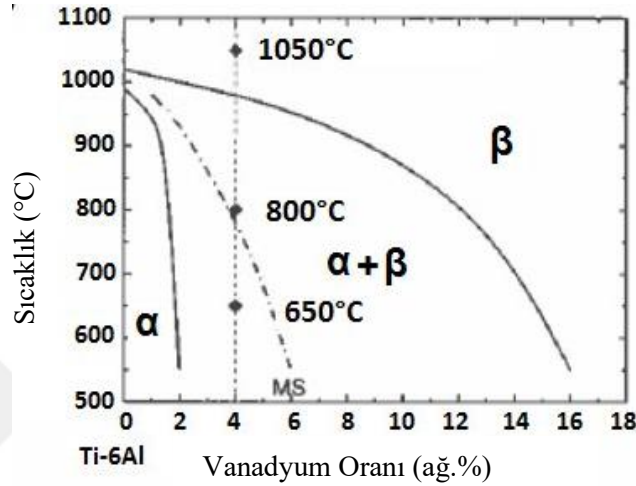
3.2.1. Ti64 Alaşımı ve Özellikleri

Alaşımlama, metallerin güçlendirilmesi için yaygın bir yöntemdir (Dernovsek vd, 2001; Ren vd, 2023). Ti64, 1950'lerde geliştirilmiş bir titanyum alaşımıdır. Bilinen ilk titanyum alaşımları arasında gösterilmektedir. Ağırlıkça %6 alüminyum ve ağırlıkça %4 vanadyum içeren bir alfa-beta türüdür. Ti64, dengeli özellikleri sayesinde titanyum alaşım malzemeler arasında en yaygın kullanıma sahiptir. Klasikleşmiş alaşımlar arasında Ti64 tek başına, kullanılan toplam titanyum alaşımı miktarının yaklaşık yarısını oluşturmaktadır.

Ti64 yüksek özgül mukavemeti, iyi korozyon direnci ve yüksek sıcaklık dayanıklılığı nedeniyle havacılık, otomotiv, tıbbi ekipman, enerji ve diğer alanlarda

yaygın olarak kullanılmaktadır (Baker vd., 2005; Ren vd, 2023; Sebastian vd, 2016; Vasudev vd, 2012).

Ti64, $\alpha+\beta$ alaşımı'dır. Lamelli ve kısmen bimodal tane yapısında oldukları için $\alpha+\beta$ alaşımları yüksek sürünme dayanımı sergilerler. Korozyona karşı yüksek dayanıma sahiptirler. Şekil 3.3'te vanadyum bileşimine bağlı Ti64 denge diyagramı görülmektedir.



Şekil 3.3. Vanadyum bileşimine bağlı Ti64 denge diyagramı (Donachie, 2000)

Alfa artı betadan veya alfadan tüm betaya dönüşüm sıcaklığı, beta transus sıcaklığı olarak bilinir. Beta transus, malzemenin %100 beta olduğu en düşük denge sıcaklığı olarak tanımlanır. Beta transus, deformasyon işleminde ve ısıl işlemde kritik öneme sahiptir. Beta transus sıcaklığının altında, eğer materyal bazı beta stabilizatörler içeriyorsa, titanyum bir alfa-artı-beta karışımıdır; aksi halde, sınırlı sayıda beta stabilizatörü içeriyorsa veya hiç beta stabilizatörü yoksa tamamı alfadır. Bu alaşımın özellikleri, beta bölgesinden veya alfa-artı-beta bölgesinden soğutma sonrasında tanelerin rafine edilmesine ve ardından söndürme sonrasında oluşan martensitin ayrıştırılması için düşük sıcaklıkta yaşlandırmaya dayanılarak geliştirilir.

3.2.2. Titanyum Metal Matris Kompozitlerin Üretim Yöntemleri

Titanyum ve alaşımlarının matris malzeme olarak kullanıldığı kompozitler için takviye elemanın şekline ve dağılımına, nihai ürünün kullanım yeri ve koşullarına göre farklı üretim metodları uygulanmaktadır. Titanyum ve titanyum alaşımları, çok çeşitli ürün formlarında üretilmektedir. Titanyum dövülebilir, dökülebilir veya toz metalurjisi teknikleriyle üretimi yapılabilir. Ergitme kaynağı, sert lehimleme,

yapıştırıcılar, difüzyonla bağlama veya bağlantı elemanları yoluyla birleştirilebilir. Titanyum ve alaşımları, nispeten kolay şekillendirilebilir ve kolayca işlenebilir (Donachie, 2000).

3.2.2.1. Fiber Yerleştirme Teknikleri

Fiber takviyeli TMK'ların folyo ve kumaş yerleştirme tekniği kullanılarak işlenmesi en eski yöntemlerden biridir. Bu süreç, dokuma fiber matların ve ortalama 0,1-0,15 mm kalınlığındaki titanyum alaşımlı folyo katmanlarıyla başlar.

Fiber matlar ve titanyum folyolar istiflenir ve çok katmanlı bir kompozit haline getirilmek üzere presleme işlemi uygulanır. Presleme için vakumla sıcak presleme veya sıcak izotaktik presleme yapılır. Bu üretim tekniğinde, yüksek fiber maliyeti, yüksek folyo maliyeti, homojen fiber dağılımı elde etme zorluğu ve çeşitli geometrik şekillerin üretilmesinin zorluğu, bu yöntemin sınırlı uygulama alanı bulmasının ardındaki ana nedenlerdir (Wood & Ward-Close, 1995).

3.2.2.2. İndüksiyon Plazma Birikimi

İndüksiyon plazma biriktirme (IPD) (Boulos, 1992) TMK'ları üretmenin başka bir yöntemidir ve ilk olarak GE Aircraft Engines tarafından kullanılmıştır. Titanyum matrisinin ince taneli, tek biçimli mikro yapısını eritmek ve fiber sargılı bir tambur üzerine püskürtmek için endüktif olarak bağlanmış bir radyo frekanslı plazma jeneratörü kullanır (Pank & Jackson, 1993). IPD işlemi sırasında, fiber aralığı sıkı bir şekilde korunur ve bu da onu TMK katmanlarının (tek bir TMK katı) üretimi için mükemmel bir aday haline getirir. Ayrıca, toz halinde üretilen hemen hemen her türlü matris metali veya alaşımı, metal matrisli kompozit katmanları üretmek üzere biriktirilebilir. Bununla birlikte, özellikle titanyum ve alaşımları için, IPD prosesinde kullanılmadan önce başlangıç tozunun karşılaması gereken sıkı bir bileşim gereksinimi vardır (Pank & Jackson, 1993).

3.2.2.3. Fiziksel Buhar Biriktirme

IPD'ye benzer şekilde, fiziksel buhar biriktirme (PVD), matris malzemesinin elektron ışını veya magnetron püskürtme yoluyla buharlaştırılması yoluyla tek fiber katmanı üzerine biriktirilmesini içerir. Her iki durumda da, ortaya çıkan katmanlar mükemmel fiber dağılımına sahiptir; matris kaplamanın kalınlığı kompozitin nihai hacim fraksiyonunu belirler. Bu yöntemle, %80'e varan çok yüksek fiber hacim

oranlarına sahip karmaşık şekilli kompozit bileşenler üretilebilir (Lobley & Quo, 1998).

3.2.2.4. Toz Metalurjisi

Toz metalurjisi (TM) işleme yöntemi, parçacık takviyeli titanyum kompozitlerin üretimi için en uygun imalat yöntemlerinden biri olarak kabul edilir. Parçacık takviyeli titanyum kompozitlerin TM ile işlenmesinde, homojen toz karışımı ve dispersiyonu, kompozitlerin iyi performansının sağlanmasındaki en önemli iki parametredir. Bazı durumlarda homojen dağılımı arttırmak veya sağlamak için yüzey kaplaması uygulanır. Takviye malzemenin seçimi, parça boyutları, morfolojileri ve takviye ile matris arasındaki arayüzey bağları kompozitlerin nihai özelliklerini belirler (Huang vd, 2010).

Bu metot, toz formundaki matris malzemesine partikül veya whisker formundaki takviye malzemelerinin karıştırıldığı ve ardından bir kalıp içinde sıkıştırılarak sinterleme işlemine tabi tutulduğu bir süreci içerir. Tozların karıştırılması işlemi, sadece mekanik karıştırma veya bu tozların kimyasal reaksiyona girmemesi için bir yardımcı sıvı kullanılarak mekanik karıştırma gibi farklı yöntemlerle gerçekleştirilebilir. Karıştırılan tozlar daha sonra sıcak veya soğuk bir pres altında sıkıştırılır.

Sıcak presleme işlemi sırasında, tozlar sıkıştırılırken aynı zamanda sinterleme işlemine tabi tutulurlar, yani sıkıştırma ve ısı işlem eş zamanlı olarak gerçekleştirilir. Bu yöntemle elde edilen ürün, soğuk presleme yöntemine göre genellikle daha yüksek bir yoğunluğa sahiptir, ancak sıcak presleme yöntemi genellikle daha maliyetlidir. Soğuk presleme yönteminde ise malzemeler soğuk bir kalıpta sıkıştırılır ve daha sonra sinterleme işlemi için ergime noktasının altındaki bir sıcaklığa maruz bırakılır.

Takviyeler, matrise iki farklı yöntemle eklenir: Katkı maddelerinin matrisle reaksiyona girip girmediğine bağlı olarak ex situ işleme tekniği ve yerinde işleme tekniği (Kondoh vd, 2010).

Ex situ işleme tekniğinde, sinterleme ve konsolidasyon sırasında yeni bileşikler oluşmadığından, mekanik öğütmede olduğu gibi dış etkiler kasıtlı olarak uygulanmadıkça, sinterlemeden önce ve sonra eklenen parçacıkların hem parçacık boyutunda hem de morfolojisinde esasen bir değişiklik olmaz. Titanyumda, SiC, TiC, TiB ve ZrC gibi termodinamik olarak stabil seramikler, ex situ işleme yolları

kullanılarak eklenir. Parçacık takviyeli titanyum kompozitlerin ex situ üretimi sadece üstün mekanik özellikler sağlamakla kalmaz, aynı zamanda aşınma direncini artırır ve kuru kayma koşulları altında sürtünme katsayısını stabilize eder (Kondoh, 2015). Matris ile takviye arasındaki zayıf bağ gibi kendi eksiklikleri nedeniyle, parçacık takviyeli titanyum kompozitlerin ex situ üretilmesine yönelik yöntemler önemli ölçüde ilgi görmemiştir.

Yerinde işleme tekniğinde, titanyum matrisinin bor, karbon, nitrojen gibi katkı elementleri ile yüksek reaktivitesi, katı hal reaksiyonu yoluyla dağılan yerinde stabil parçacıklar veya iğne benzeri takviyeler oluşturmak için kullanılır. Yerinde işleme için bazı yaygın başlangıç katkı maddeleri TiB_2 , B_4C , Cr_3C_2 ve Si_3N_4 'tür. Örneğin, katkı maddesi olarak TiB_2 parçacıkları kullanıldığında, titanyum tozu sinterleme sırasında TiB_2 parçacıklarıyla reaksiyona girebilir, bu da TiB parçalarının oluşmasına ve matris içinde takviye olarak dağılmasına neden olur. Yerinde işleme durumunda matris ile takviye arasındaki daha iyi arayüzey bağlantısı, tribolojik performansın artmasına yol açar. Ayrıca, yerinde tekniklerle üretilen kompozitler, yüksek spesifik mukavemet ve modülün yanı sıra mükemmel oksidasyon ve sürtünme direnci de sergiler (Kondoh, 2015). Bununla birlikte, ara yüzey kusurlarının oluşmasını önlemek için yerinde reaksiyonların dikkatli bir şekilde kontrol edilmesi gerekir. Geleneksel toz metalurjisinin yanı sıra, kendi kendine yayılan yüksek sıcaklık sentezi (SHS) (Ayers vd, 2007), katmanlı imalat (Frazier, 2014) ve külçe metalurjisi teknikleri (Guo vd, 2012) de yerinde parçacık takviyeli titanyum kompozitlerin üretilmesi için kullanılmıştır.

3.2.2.5. Hızlı katılaşma süreci

Geçtiğimiz yirmi yılda, hızlı katılaştırma teknolojileri önemli ölçüde ilerleyerek parçacık takviyeli titanyum kompozitlerin işlenmesi için potansiyel bir üretim tekniği haline gelmiştir (Li vd, 2017; Srivatsan vd, 1995). Atomizasyon, metalik tozların seri üretimi için yaygın bir tekniktir. Takviyelerin eriyiğe eklenmesi durumunda atomizasyon yoluyla takviyeleri içeren kompozit toz üretilir. Martin Marietta Laboratories, hem titanyum metali hem de titanyum intermetalik matris kompozitlerini üretmek için yeni bir külçe metalurjisi yaklaşımı geliştirmiştir (Christodoulou vd, 1988). Ancak bu yöntem matris malzemesine yakın yoğunluğa sahip olması gereken donatılarla sınırlıdır. Takviyelerin yoğunluğu matrisinkinden önemli ölçüde farklıysa, atomizasyon işlemi, parçacıkların toplanmasından dolayı kompozit tozdaki

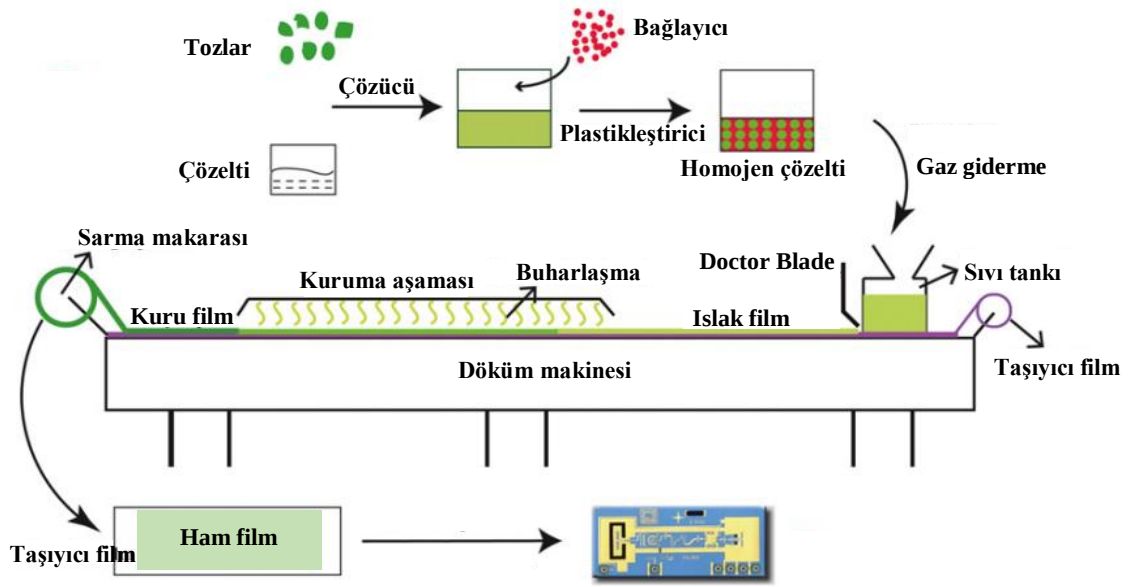
takviyelerin düzgün olmayan bir şekilde dağılmasına yol açabilir. Hızlı katılaşmayla ilişkili dengesizlik, titanyuma nadir toprak alaşım elementlerinin eklenmesi gibi ek alaşımlama stratejileri için potansiyel yaratır (Godfrey vd, 2000). Tablo 3.1’de Ti metal matrisli kompozitlere takviyeler için çeşitli örnekler verilmiştir.

Tablo 3.1. Parçacık takviyeli titanyum metal matrisli kompozitler için çeşitli takviyelere örnekler (Hayat vd, 2019).

Takviye Elemanı	Ergime Sıcaklığı (°C)	Yoğunluk (g/cm ³)	Elastisite Modülü (GPa)	Termal Genleşme Katsayısı (x10 ⁻⁶ /K)
TiB	2200	4,50	425-480	8,60
TiC	3160	4,99	440	6,52-7,15 (25-500°C)
TiN	3290	3,97	420	8,30
SiC	2697	3,19	430	4,63 (25-500°C)
TiB ₂	2980	4,52	500	4,60-8,10
Grafen	3852	2,00	1000	—
KNT	3379	1,70-2,00	1000	—
B ₄ C	2447	2,51	445	4,78 (25-500°C)
La ₂ O ₃	2217	6,51	—	5,8-12,1 (100-1000°C)

3.2.2.6. Şerit Döküm Yöntemi

Şerit döküm yönteminde toz malzeme, çözücü, dağıtıcı, plastikleştirici ve bağlayıcıdan oluşan bir çamur kullanılır. Havası alınmış, iyice yayılmış çamur hareketli bir taşıyıcıya dökülür ve ince bir bıçakla düzleştirilir. Yüksek eşdağılımlı bir katman oluştuktan sonra çözücü buharlaştırılır ve geriye pişirilecek kadar sağlam bir şerit kalır. Şerit döküm yöntemine ‘Doctor Blade Yöntemi’de denmektedir. Şekil 3.4’te şerit döküm düzeneğine ait bir görsel verilmiştir.



Şekil 3.4. Şerit döküm düzeneği (Ren vd, 2018)

Şerit döküm yöntemi, geniş ve düz seramik levhaların üretimi için sıklıkla kullanılan, uygun maliyetli bir yöntemdir. Şerit döküm teknolojisinin çoğu uygulaması elektronik endüstrisine yöneliktir. Ancak bazı çalışmalar katı oksit yakıt hücreleri veya lamine kompozitler gibi farklı uygulamalar için de bu yöntemi kullanmışlardır. Ayrıca karmaşık geometrilere sahip parçaların üretilmesi veya daha yüksek mukavemetli, daha iyi termal davranış gibi gelişmiş özelliklere sahip çok katmanlı parçalar oluşturmak mümkündür (Bitterlich & Heinrich, 2002; Jingxian vd, 2004). Şerit döküm yöntemiyle üretilen gözenekli levhaların, sandviç paneller veya biyomedikal implantlar gibi yapısal parçalarda kullanılma potansiyeline yüksektir (Daudt vd, 2019).

Şerit döküm çamuru, her bir bileşenin çamur özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu karmaşık bir sistemdir. Yüksek kaliteli ürünlerin güvenilir bir şekilde işlenmesini sağlamak için katı bileşenlerin homojen bir şekilde dağılması son derece önemlidir (Jingxian vd, 2004). Şerit döküm çamuru, inorganik ve organik bileşiklerden oluşur. Karışımın organik bileşikler çözücüler, dağıtıcılar, bağlayıcılar, plastikleştiriciler ve diğerleridir (ısılatıcı maddeler, homojenleştiriciler, deforme ediciler).

Şerit döküm teknolojisinde kullanılan tipik çözücüler şunlardır: su, metil alkol, etil alkol, izopropil alkol, toluen, aseton, etil asetat ve diğerleri. Çözücünün ana işlevi, dağıtıcı bir araç olarak hareket etmek ve organik bileşenlerin çözünmesini sağlamaktır

(Jingxian vd, 2004). Süspansiyonun kararlılığı (sedimentasyon ve aglomerasyon süreçlerinden kaçınmak için) dağıtıcı kullanımı ile korunmaktadır. Dağıtıcı olarak kullanılan tipik malzemeler inorganik çözücülerdir (fosfat esterler, Menhaden balık yağı, gliseril trioleat vb).

Bağlayıcı olarak kullanılan tipik organik bileşikler, polisakkaritler, polivinil alkol, polivinil butiral, polimetil metakrilatlar ve diğerleridir. Tipik sıvılaştırıcılar PEG, dioktil ftalat, trietilen glikol, dietil oksalat ve diğerleridir.

Şerit döküm yönteminde kullanılan literatüre geçmiş bazı çamur bileşenlerinin tablosu verilmiştir (Tablo 3.2).

Tablo 3.2. Şerit dökümde kullanılan tipik dağıtıcı, bağlayıcı ve plastikleştiriciler.

Çözücüler	Dağıtıcılar	Bağlayıcılar	Plastikleştiriciler
Metil etil keton (MEK)	Balık yağı	Polivinil alkol	Bütil benzil ftalat
Aseton	Kastor yağı	Polivinil bütiral	Dibütil ftalat
Etanol/izopropanol	Tribütil fosfat	Poliakrilat ester	Dimetil ftalat
MEK/etanol	Trietanolamin	Akrilik reçine	Dioktil ftalat
MEK/tolüen	Mısır yağı	Metil selüloz	Polietilen glikol
MEK/aseton	Fosfat ester	Etil selüloz	Bütil sterat
Tolüen	...	Polimetil metakrilat	...
Etanol/tolüen		Polipropilen karbonat	
Etanol/izopropanol/tolüen		...	
MEK/etanol/siklohegzanol			
...			

Şerit döküm yöntemi, seramik şeritlerin yanı sıra, düşük kalınlığa ve düşük gözenekliliğe sahip büyük ölçekli metal levhaların üretimi için de uygun bir üretim yöntemidir. Bu nedenle, titanyum ve alaşımları gibi daha az sünek metallerin ince şeritler formunda üretimi için de umut verici bir üretim yoludur (Daudt vd, 2019).

Şerit döküm yöntemiyle, bir altlık üzerine ince tabaka halinde dökülen malzeme, istenen özelliklere ya da kullanıma amacına göre farklı işleminden geçerek süreç tamamlanır. Metal matrisli kompozit üretiminde genel olarak dökümden sonraki süreç şu şekilde işler;

- atmosfer koşullarında veya vakum altında, ısı verilerek veya verilmeyerek kurutma,

- isteğe bağlı çeşitli geometrilerde kesme, üç boyutlu şekil verme,

- organik maddelerin uzaklaştırılması için ısı işlem,

- sinterleme işlemi.

Bazı durumlarda sinterleme işleminden sonra da malzemelere farklı işlemler (haddeleme, tavlama vb.) uygulanarak istenen mekanik veya fiziksel özelliğin kazandırılması mümkün olmaktadır (Mistler, 1995).



4. MATERYAL VE YÖNTEM

4.1. Materyal

Bu çalışmada Ti64 tozu, grafen tozu ve bunların yanında döküm çamuru hazırlamak için bağlayıcı, çözücü, dağıtıcı ve plastikleştirici gibi organik maddeler kullanılacaktır. Hazırlanacak olan karışımı kullanılacak bu bileşenlerin her biri bu bölümde ayrıntılı olarak ele alınmıştır.

4.1.1. Ti64

Zayıf tribolojik özellikleri, yüksek ve değişken sürtünme katsayısı titanyum ve alaşımlarının kullanımını sınırlamaktadır. Bu nedenle Ti64 alaşımı genellikle aşınmanın kritik olmadığı uygulamalarda tercih edilmektedir. Ancak aşınma dayanımını artırıcı takviyeler ile güçlendirilmeleri, Ti64 gibi alaşımların kullanım alanını genişletmektedir. Ancak bunun yanında düşük yoğunluk, yüksek mukavemet, mükemmel korozyon direnci, biyouyumluluğu ve yüksek sıcaklık dayanıklılığı gibi üstün özellikleri de Ti64'ün bir çok uygulamada yer verilen metal kompozitlerin matris malzemesi olarak kullanımını artırmıştır.

Bu çalışmada kullanılan matris metali Ti64'tür. Nanografi firmasına ait, %99,9 saflıkta Ti64 kullanılmıştır. Tablo 4.1'de Ti64'ün bazı mekanik özellikleri verilmiştir.

Tablo 4.1. Ti64'ün mekanik özellikleri (Boyer vd, 1994; Donachie, 2000)

Mekanik özellikler		Elektriksel Özellikler	
Sertlik, Vickers	349	Elektriksel Direnç	0,000178 ohm-cm
Maksimum çekme dayanımı	950 MPa	Manyetik geçirgenlik	1.00005
Akma dayanımı	880 MPa	Termal Özellikler	
Kopma uzaması	%14		
Kopma büzülmesi	%36	20°C	8,6 µm/m
Elastisite Modülü	113,8	250°C	9,2 µm/m
Poisson Oranı	0,342	500°C	9,7 µm/m
Charpy Etkisi	17J	Özgül Isı Kapasitesi	0,5263 J/g
Kırılma Tokluğu	75 MPa√m	Termal iletkenlik	6,7 W/mK
Kayma modülü	44 GPa	Erime noktası	1604 - 1660°C
Kesme Dayanımı	550 MPa	Solidus	1604°C
Fiziki özellikler		Liquidus	1660°C
		Beta Transus	980°C
Yoğunluk	4,43 gr/cc		

4.1.2. Grafen

Grafen esnek, oldukça mukavemetli, süper ince, hafif ve biyouyumlu bir malzeme olup günümüzdeki bilimsel araştırmalarda özgün kullanıma sahiptir (Zhai vd, 2014; Zhai vd, 2015). Bu iki boyutlu malzeme altı adet karbon halkalarının bir araya gelmesiyle oluşan nano-karbon tabakalarıdır. Grafenin sahip olduğu güçlü karbon bağları bu malzemeye bilinen en mukavemetli malzemelerden biri olma özelliğini sağlamıştır. Grafen metal matris içerisinde kullanıldığında sahip olduğu katı yağlayıcı özelliği nedeniyle kompozit malzemeye düşük sürtünme ve yüksek aşınma dayanımı kazandırmaktadır.

2008'li yıllardan bu yana kapsamlı bir şekilde çalışılan grafen, metal ve seramik matrisli kompozitlerde kullanılabilecek nispeten yeni bir parçacık takviyesidir. Tek katmanlı, iki katmanlı, birkaç katmanlı ve çok katmanlı grafen parçacıkları, ayırt edici iki boyutlu yapıları ve olağanüstü mekanik özellikleri, ısı iletkenliği, inertliği, elektriksel iletkenliği ve yüzey özellikleri nedeniyle çeşitli uygulamalar için umut verici özellikler içerir. Bu çalışmada tek katmanlı grafen kullanılmıştır.

Grafen (sp^2 hibridizasyonu ile karbon atomlarıyla bağlanmış), 130 GPa'lık çekme mukavemeti ve 1 TPa'lık bir elastisite modülüne sahiptir. Oda sıcaklığında grafenin ısı iletkenliği, sektördeki en iyi ısı iletkenlerinden biri olan elmasın iki katı değerine (5000 W/mK'e) kadar ulaşır. Bu karbon allotropu aynı zamanda grafit ve KNT'ler gibi diğer allotroplara kıyasla, matris malzeme ile etkileşimi kolaylaştırabilen daha geniş bir yüzey alanına sahip olma avantajını taşır. Ek olarak, grafenin düz geometrik şekli, kompozit üretimi sırasında yüksek basınca dayanabilir ve bu da onu burkulmaya ve çatlamaya daha az eğilimli hale getirir. Parçacıkların matris içinde düzgün dağılımı, mekanik özellikler açısından en iyi kompozit kalitesini sağlar. Grafen nanoparçacıkları, daha büyük en-boy oranlarından dolayı matris içerisine kolayca dağılabilirken nispeten daha düşük topaklanma eğilimine sahiptir (Bauri & Yadav, 2017). Grafenin özellikleri Tablo 4.2'de verilmiştir.

Tablo 4.2. Grafenin özellikleri (Şenel, 2015)

Özellikler	Değer
Hibrit şekli	sp ²
Tabaka sayısı	Tek tabakalı
Kristal yapısı	Hegzagonal
Boyut	İki
Saflık derecesi (%)	99
Kütleli (bulk) yoğunluk (g/cm ³)	~0,3
Gerçek yoğunluk (g/cm ³)	2,25
Kalınlık (nm)	~1-2
Yüzey alanı (m ² /g)	2600
Yüksek sıcaklık direnci	-75 +200°C arasında özellikleri değişmiyor
Termal iletkenliği (W/mK)	4840-5300
Elektron hareketliliği cm ² /(V.s)	~2,5x10 ⁵
Elastisite Modülü (TPa)	~1

4.1.3. Polivinil bütiral (PVB)

Polivinil bütiral (PVB), polivinil asetatlar grubundan bir plastiktir. Kimyasal formülü (C₈H₁₄O₂)_n şeklindedir. Polivinil bütiral, güçlü yapışma, optik netlik, tokluk ve esneklik gerektiren uygulamalar için kullanılır. Alkoller, esterler, ketonlar ve alkol ve aren karışımları gibi çözücülerde çözünür. Çeşitli uygulamalarda bağlayıcı özelliği nedeniyle tercih edilmektedir (Olabisi & Adewale, 2016).

PVB 'nin özellikleri:

- İyi yapışma ve film oluşturma özellikleri
- İyi esneklik
- İyi su direnci
- Yüksek yapışma
- Çok iyi termoplastik işleme
- Organik çözücülerle yüksek uyumluluk
- Optik şeffaflık
- Diğer polimerlerle uyumluluk

Bu çalışmada plastikleştirici ve bağlayıcı özelliği nedeniyle PVB kullanılması uygun görülmüştür. Sigma Aldrich Marka Butvar B-98 PVB kullanılmıştır.

4.1.4. Polietilen glikol

Polietilen glikol, endüstriyel üretimden ilaca kadar pek çok uygulama ile petrolden elde edilen bir polieter bileşiğidir. PEG, moleküler ağırlığına bağlı olarak

polietilen oksit veya polioksietilen olarak da bilinir. PEG yapısı genellikle $H-(O-CH_2-CH_2)_n-OH$ olarak ifade edilir. Beyaz renkli kristalize toz görünümündedir (Olabisi & Adewale, 2016). Bu çalışmada bağlayıcı özelliğinden faydalanılmak amacıyla PEG kullanılması uygun görülmüştür.

4.1.5. Etanol (EtOH)

Karakteristik olarak hoş bir koku ve yanma tadı da içeren berrak renksiz bir sıvı özelliğindedir. Çok yanıcı bir kimyasal maddedir. Bundan dolayı çok tehlikelidir.

Taşıması sırasında gerekli ambalaj ve güvenlik tedbirleri alınmalıdır. Etil alkolü sanayide vazgeçilmez kılan en önemli özelliği diğer maddeleri çözmek için kullanılmasıdır. Muhteşem bir çözücü etkisi vardır. Uçucu kimyasal madde özelliğinde kabul edilir. Bazı reaksiyonlarda viskozite ayarlayıcısı olarak etil alkol kullanılmaktadır. Buharı havadan ağırdır. Buharının havadan ağır olmasından dolayı zemine çöker. Birçok organik çözücü ile karıştırılabilir. Kimyasal özelliklerinden bazıları şöyledir (Acton, 2012).

- Molekül Formülü (Etil Alkol): CH_3CH_2OH
- Molekül Ağırlığı: 46,069 g/mol
- Kimyasal Adı: Etanol, Etil Alkol
- Erime noktası: 114°C'dir.
- Kaynama noktası: 78,5°C'dir.
- Yoğunluğu: 0,8 g/cm³'tür.
- Parlama noktası: 9-11°C aralığındadır. Bu sıcaklık değeri, bir kimyasal maddenin yapabilmesi için çok düşük sıcaklıktır.

Bu çalışmada etanolün çözücü özelliğinden yararlanmak amacıyla kullanılması uygun görülmüştür. Ayrıca çalışmada dezenfekte ve sterilizasyon işlemleri için de etanol kullanılmaktadır. Kullanılan etanol, Sigma-Aldrich marka %99,8 saflıkta etanoldür.

4.1.6. Ksilen

Ksilen (xylene) renksiz, kolayca alevlenebilen ve zehirli bir sıvıdır. Patlayıcıdır. Benzene iki adet metil grubu bağlanmasıyla oluşan ve $C_6H_4(CH_3)_2$ kapalı formülü ile gösterilen bir bileşiktir. Ksilen disüstitüe benzen olduğundan adlandırılması da benzerdir. Toluenle akraba sayılır. Uçucu organik bileşiklerdendir. Zehirli sayılabilecek kanserojen bir bileşik olarak tanımlayabiliriz. Ksilen özellikleri ve

türevleri kömür katranından petrole kadar uzanır. Ksilenlerin başlıca kaynağı, kömür katranı ve petroldür. m-Ksilen diğerlerine nispetle daha büyük yüzdelerde bulunur. Orto, meta ve p-Ksilenleri birbirinden ayırmak için ayırmsal damıtma ve kristallendirme işlemleri uygulanır. Ksilenler uçak yakıtlarının bileşiminde yer alır. Boya, elyaf, lak ve kauçuk endüstrisinde kullanılır.

Ksilen kimyasal ve fiziksel özellikleri ilgili izomerlere göre değişir. Sudan daha az yoğundur. Ksilen, toluen ve benzen'in metilasyonu ile üretilir. silen çözücü olarak kullanılır. Solvent ksilen genellikle küçük bir yüzdesine kadar etilbenzen içerir. Bireysel izomerler gibi, karışım renksiz, tatlı kokulu ve oldukça yanıcıdır. Ksilen uygulama alanları baskı, kauçuk ve deri endüstrilerini kapsar. Mürekkebin, kauçuğun ve yapıştırıcıların ortak bir bileşenidir. Ksilen Boya ve vernikleri inceltirken, yavaş kurutmanın istenildiği yerde tolüen yerine geçebilir ve bu nedenle çözünürlük testinde sanat nesnelerinin koruyucuları tarafından kullanılır. Suda çözünmez, organik solventlerle karışabilir. Sıvı ve renksiz bir yapıdadır.

- Kimyasal Formülü: $C_6H_4(CH_3)_2$
- Molekül Ağırlığı: 106,17 gr/mol
- Saflık Derecesi (%): 96
- Parlama Noktası (°C):62
- Kaynama Noktası (°C): 138,15
- Erime Noktası (°C): -47,4
- Yoğunluğu: 0,865 gr/cm³

Bu çalışmada ksilenin çözücü özelliğinden yararlanmak amacıyla kullanılması uygun görülmüştür.

4.1.7. Balık Yağı

Kaliteli bir balık yağında homojen, tortusuz bir görünüm vardır. Kıvamı akıcıdır. Berrak sarı renklidir, balığa has kokuludur ve tadı acı değildir. Balık yağının kimyasal spesifikasyonları

Tablo 4.3'de verilmiştir (Gamsız vd, 2019). Bu çalışmada dağıtıcı olarak balık yağı kullanılmıştır.

Tablo 4.3. Balık yağının kimyasal özellikleri (Gamsız vd, 2019)

Parametreler	Kabul Değerleri
Nem	Maks. 1
Peroksit	<5 meg/kg
p-Anisidin	<20 meg/kg
%FFA	Maks. 15 mg/kg
İyot	Min. 100
Toplam Yağ Asitleri	Min. %85
Sabunlaşmayan Madde (mg/KOH/gr)	Maks. 1
Tortu	Maks. 0,5
Kırılma İndisi	1,473-1,475
PCDDs (Dioksin)&PCDFs (Furanlar)	Maks. 2 pg
PCBs (poliklorlubifeniller)	<0,09 mg/kg
TOTOX (Total Oxidation)	Maks. 26 meg/kg

4.2. Yöntem

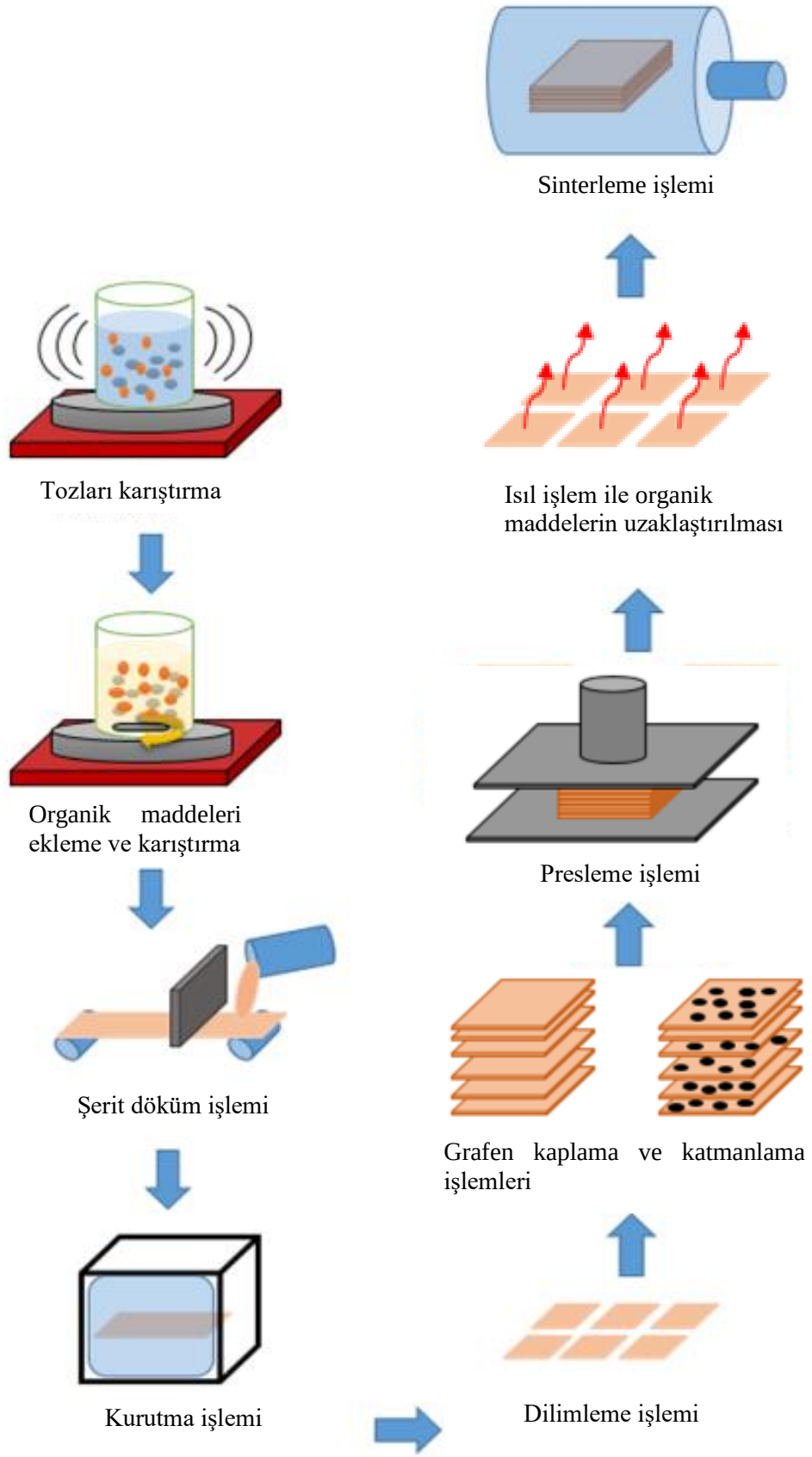
Bu tez çalışmasında, grafen takviyeli Ti64 matrisli kompozit malzemelerin üretilmesi amacıyla şerit döküm yöntemi kullanılmıştır. Döküm işleminin uygulanacağı şerit döküm düzeneği de tez çalışması kapsamında tasarlanarak imalatı gerçekleştirilmiştir.

Şerit döküm çamurunun hazırlanmasında matris malzeme olarak Ti64, takviye malzeme olarak grafen ve bunların yanısıra bağlayıcı, çözücü, dağıtıcı gibi gereksinimlerin karşılanması amacıyla organik maddeler kullanılmıştır. Ti64 matris malzeme içerisine ağırlıkça farklı oranlarda grafen tozu takviye edilmiştir. Hazırlanan döküm sıvısı kullanılarak, altlık tabaka yerleştirilen döküm ünitesinde ince katman şeklinde döküm işlemi uygulanmış ve ardından kapalı bir ortamda kurutma işlemi tamamlanmıştır. Kurumanın ardından istenen geometrilerde dilimleme işlemi uygulanarak iki farklı formda (grafen ara katmanlı/katmansız) çok katmanlı kompozit malzeme oluşturulmak üzere katmanlama ve presleme işlemleri gerçekleştirilmiştir. Hazırlanan malzemeler inert gaz ortamında 1000°C ile 1500°C arasında değişen sıcaklıklarda ve 1 ile 5 saat arasında değişen sürelerde sinterleme işlemine tabi tutulmuştur. Üretilen kompozit malzemeler çeşitli mekanik testlerden ve mikroskopik incelemelerden geçirilerek mekanik özellikleri ve mikroyapı özellikleri ortaya konmuştur.

Özetle, bu çalışmada şerit döküm yöntemiyle grafen takviyeli ve çok katmanlı kompozit malzeme üretilmesi aşamaları şu şekildedir:

- Ti64 metal alaşım tozunun öğütülmesi,
- Çözücü, bağlayıcı, dağıtıcı ve plastikleştirici malzemelerin eklenerek düşük viskoziteki bir sıvı karışım oluşturulmak üzere karıştırma işlemi uygulanması,
- Şerit döküm düzeneğinde altlık yüzey üzerine karışımın dökülmesi,
- Oda koşullarında ve kapalı ortamda yavaş kuruma gerçekleştirilmesi,
- Döküm malzemesinin altlık yüzeyden kaldırılması,
- İstenen geometride ve boyutta parçalar elde etmek üzere dilimleme işleminin gerçekleştirilmesi,
- Ara katman grafen kaplamasının gerçekleştirilmesi,
- Katmanlama işleminin gerçekleştirilmesi,
- Çok katmanlı malzemenin preslenmesi ve ardından sinterleme işlemine tabi tutulması.

Üretim aşamalarını gösteren adımlar Şekil 4.1’de verilmiştir.



Şekil 4.1. Şerit döküm yöntemiyle grafen katkılı ve çok katmanlı Ti64 kompozitlerin üretim aşamaları

4.2.1. Şerit Döküm Ünitesi Tasarımı ve Üretimi

Şerit döküm yöntemi kullanılarak üretilecek olan Ti64 matrisli şerit kompozit malzeme üretimi için, döküm ünitesinin tasarımı ve imalatı Ondokuz Mayıs Üniversitesi Makine Mühendisliği Laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir. Şerit döküm ünitesi öncelikle bilgisayar ortamında tasarlanıp modellenerek simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Ardından kontrol sistemi tasarımı yapılmış ve son olarak da üretim ve montaj süreci tamamlanmıştır.

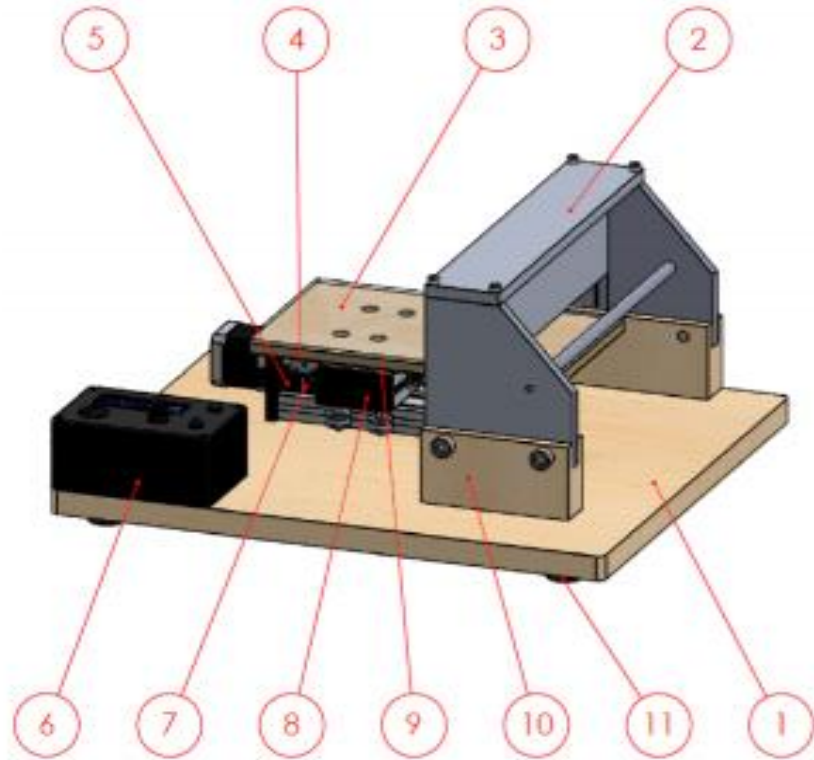
4.2.1.1. Şerit Döküm Ünitesi Tasarımı

Şerit döküm ünitesinin tasarımı üç aşamada gerçekleştirilmiştir.

1. 3D modelleme
2. Kontrol sisteminin tasarımı
3. Simülasyon.

a) 3D Modelleme

Doctor Blade ünitesinin 3D modellemesi için SolidWorks programında parçaların teknik resimleri ve montaj resmi hazırlanmıştır (Şekil 4.2). Tablo 4.4’de sisteme ait numaralandırılmış parçaların açıklamaları verilmiştir.



Şekil 4.2. Şerit döküm ünitesi montaj resmi

Tablo 4.4. Parça numaraları ve açıklamaları

No	Parça No	Açıklama	Adet
1	Pç-001	Taban	1
2	Pç-009	Doctor Blade	1
3	Pç-007	Üst Cam	1
4	Pç-004	Tabla	1
5	Pç-006	Limit Switch Tutucusu	1
6	Pç-008	Kontrol Paneli	1
7	Pç-005	Limit Switch	2
8	Pç-010	Linear Actuator	1
9	Pç-003	Tabla Braketi	1
10	Pç-002	Yükseltici	2
11	Pç-011	Ani Titreşim Ayak	4

b) Kontrol Sistemi Tasarımı

Mekanizmanın çalışmasını sağlayan kontrol sistemi, makinenin hızı, yönü gibi işlemleri denetleyen bir sistemdir. Kontrol sisteminin tasarımı makinenin hız hesaplamaları, elektrik devrelerinin tasarlanması ve programlama gibi aşamaları kapsar.

Şerit döküm ünitesi aşağıdaki özelliklere sahiptir;

- 450x400x208 mm taşınabilir boyutlardadır.
- Kontrol sistemi üç şekilde yönlendirilebilir: ister analog (butonlar, hız potansiyometresi ve LCD ekranı kullanarak) ister kablosuz bağlantı aracılığıyla (Bluetooth telefon uygulaması kullanarak), istenirse de bu iki yöntemin birleştirilmesi şeklinde.
- Ayarlanabilir hıza sahiptir. İhtiyaca göre 0,3 – 1,5 cm/s arasındaki hızlarda çalıştırılabilir.
- 11 cm toplam sürüş mesafesine sahiptir.
- Mesafenin sonunda makine kendisi durur. Böylece herhangi bir çarpma meydana gelmez.

c) Simülasyon

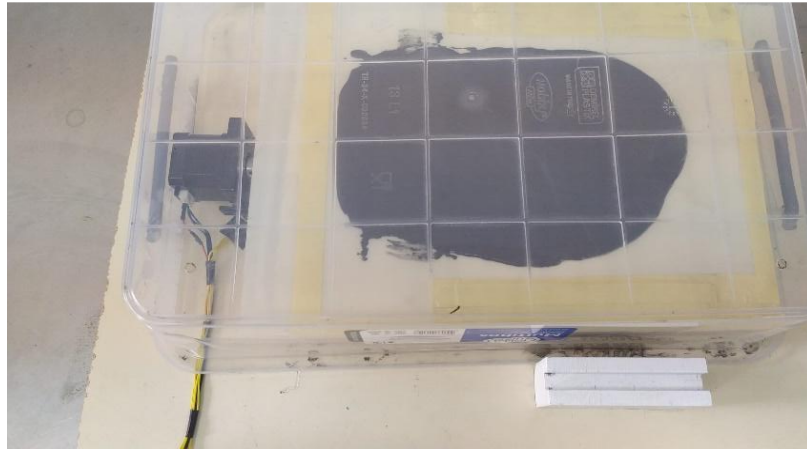
Makinenin parçaların montajı yapıldıktan sonra SolidWorks'te motion study simülasyonu yapılmıştır. Kontrol sistemi ise, devre ve program kodları Tinkercad ve Wokwi siteleri kullanarak simülasyonu da yapılmıştır.

4.2.1.2. Şerit Döküm Ünitesi Üretimi

Şerit döküm düzeneğinin montajı için taşıyıcı plaka olarak mdf parça kullanılmıştır. Taşıyıcı taban üzerine elektronik kontrol ünitesi ve Doctor Blade düzeneği yerleştirilmiştir. Döküm sıvısının döküleceği altlık malzemenin yerleştirildiği hareketli mekanizma da yerleştirilerek sabitlenmiştir.

Doctor Blade, istenen geometride ve boyutta olacak şekilde imal edilmiştir. Bu parça, hareketli altlık üzerinde kalacak şekilde taşıyıcı mdf üzerine destekleyici ayaklar vasıtasıyla sabitlenmiştir. Blade üzerinde bulunan ayar vidası ile yukarı aşağı yönlü hareket eden sıyrıcı bıçak, altlık üzerine dökülen döküm sıvısını istenen kalınlıkta yaymaya olanak sağlamaktadır. Döküm işlemi tamamlandıktan sonra sıyrıcı bıçak düzeneğin üzerinden ayrılarak koruyucu hazne düzenek üzerine kapatılmaktadır.

Şerit döküm ünitesi eş dağılımlı bir döküm kalınlığına ulaşmayı sağlamaktadır. Üretilmek istenen malzeme kalınlığına göre, sistemdeki Doctor Blade başlığının yukarı aşağı yönlü hareketiyle sıyırma mesafesi ayarlanabilmektedir. Döküm işlemi uygulanırken istenen kalınlığa ayarlanan sıyrıcı bıçak ile döküm yapılabilir. İlerleme hızı olarak istenen değer kontrol paneli üzerindeki potansiyometre yardımıyla ayarlanabilir. Döküm altlığı olarak kullanılması uygun görülen taşıyıcı altlık, hareketsiz tabla üzerine sabitlenmiştir. Döküm işleminin tamamlanmasının ardından, döküm ünitesinin üzerine boşluksuz şekilde yerleştirilen kapak (koruyucu hazne) ile dış ortamdan izole edilen malzeme istenen sürelerde kurumaya bırakılır. Koruyucu haznenin üzerinde buharlaşan gazların atılmasını sağlayan delikler bulunmaktadır. (Şekil 4.3).



Şekil 4.3. Döküm ünitesi ile koruyucu kapak altında kurumaya bırakılan malzeme

4.2.2. Şerit Döküm Çamurunun Optimizasyonu

Döküm işlemi için hazırlanacak sıvı karışım kompozisyonunun hazırlık aşamaları birbiri içinde homojen çözünebilen ancak birbiriyle tepkimeye girmeyen bileşenlerin seçilmesi ile başlar. Bunun için gerek literatürdeki örnekler, gerekse kullanılacak malzemelerin fiziksel ve kimyasal özellikleri göz önünde bulundurulur. Tablo 4.5, bu çalışmada kullanılan bileşenleri ve yapılan farklı kompozisyonlar için bu bileşenlerin ağırlıkça yüzdelerini göstermektedir.

Tablo 4.5. Şerit döküm işleminde kullanılan çamur bileşenlerinin ağırlıkça yüzde oranları

Bileşen	Ağırlıkça Yüzde (ağ.%)							
	1. Komp.	2. Komp.	3. Komp.	4. Komp.	5. Komp.	6. Komp.	7. Komp.	8. Komp.
Ti64	65	65	70	47	60	60	60	60
Etanol	15	15	12,5	23	15	20	10	10
Ksilen	15	15	12,5	23	-	-	5	10
PVB	2,5	2,5	2,5	4	3	3	3	3
PEG	2	2	2	3	2	1	2	1
Balık yağı	0,5	0,5	0,5	-	-	-	-	-
MEK	-	-	-	-	20	16	20	16

Tablodaki bileşen çeşitleri ve oranlarına göre çeşitli çözelti kompozisyonları hazırlanarak en uygun döküm çamurunun elde edilmesi sağlanmıştır. Bu optimizasyon çalışmalarında, çamurun fiziksel ve kimyasal yapısının uygunluğu, döküm işlemi sırasındaki parametreler ve de kuruma sonrası elde edilen şerit tabakanın yapısı gözlemlenerek en başarılı sonuçlar ortaya koyulmuştur. Yapılan kompozisyon çalışmalarının detayları ve sonuçları analiz edilmiştir.

a) 1. Kompozisyon İçin Uygulanan İşlem Adımları

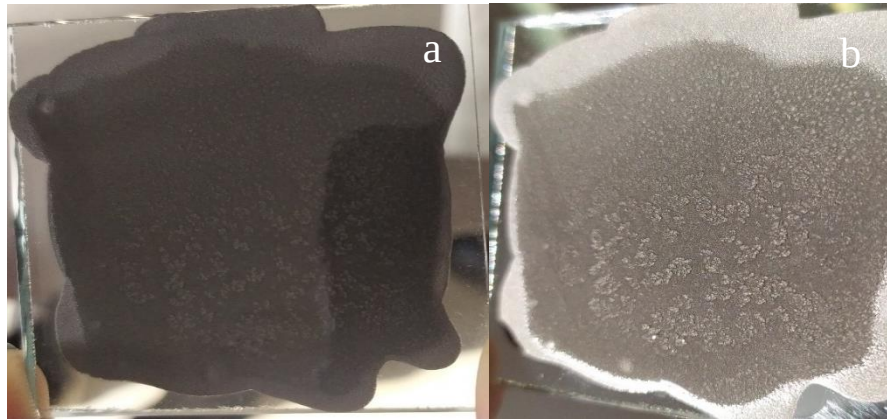
İlk kompozisyon için Tablo 4.5’de bulunan değerlere karşılık gelen miktarlarda bileşen ilavesi ile çamur hazırlanmıştır. Çamurun hazırlanması kısmında aşağıdaki adımlar izlenmiştir:

- Toplam etanol ve ksilen miktarı birbiri ile karıştırılmıştır. Sıvı karışım eşit oranda iki ayrı beher içerisine ayrılmıştır.

- Sıvı karışımlardan biri içerisinde PEG ve PVB kontrollü bir şekilde manyetik karıştırıcıda çözülmeye bırakılmıştır. Tüm toz malzemenin çözülmesi ve homojen bir karışım elde edilmesi için geçen süre 30 dakikadır.
- Sıvı karışımlardan bir diğeri içerisinde ise Ti64 tozu manyetik karıştırıcıda karıştırılmaya bırakılmıştır (30 dakika).
- EtOH+Xy+PEG+PVB karışımının içerisinde balık yağı eklenerek 10 dakika daha karışmaya bırakılmıştır.
- Son aşama olarak EtOH+Xy+PEG+PVB karışımı manyetik karıştırıcı üzerinde karışmakta olan EtOH+Xy+Ti64 karışımı içerisinde kontrollü bir şekilde ilave edilmiştir.
- Tüm karışım 3 saat süre ile Malzeme Mühendisliği Bölüm laboratuvarında bulunan bilyalı değirmende, ağırlıkça %100 oranında ve 3 mm çapında zirkonya bilya kullanılarak karıştırılmıştır.
- Döküm sıvısı daha sonra altlık yüzeyine dökülerek oda koşullarında kurumaya bırakılmıştır.

1. Kompozisyon ile hazırlanan numunelere yönelik gözlemler şu şekildedir:

Hazırlanan döküm çamuru değirmenden alındıktan sonra malzemenin özellikle katı madde kısmının bilyalar üzerinde biriktiği görülmüştür. Bunun sebebinin çok fazla oranda bilya kullanımı olabileceği ve uzun süren karışma süresi olabileceği düşünülmüştür. Malzeme içerisinde gözle görülür bir şekilde homojen olmayan bölgeler meydana gelmiştir (Şekil 4.4).



Şekil 4.4. Kompozisyon uygulamasına ait malzeme görüntüleri: (a) ilk döküm anındaki numune, (b) kuruma aşamasındaki numune

1. Kompozisyon sonrası gözlemlere dayalı olarak yapılması planlanan iyileştirmeler:

- Bilya üzerine sıvı katı madde miktarının engellenmesi için bilya oranının azaltılması ve karıştırma süresinin de bununla birlikte azaltılması düşünülmüştür.
- Döküm karışımının bilyalı değirmende yeterince homojen karışmadığı ve tozların topaklanması sonucu homojen olmayan yüzey görüntüsü elde edildiği görülmüştür. Buna karşın, karışımı Makine Mühendisliği Bölüm laboratuvarında bulunan yüksek enerjili bilyalı değirmende karıştırma işlemi uygulanmıştır. Farklı eksenlerdeki dönme ile karışımın topaklanma olmadan daha homojen hale gelebileceği düşünülmüştür.

b) 2. Kompozisyon İçin Uygulanan İşlem Adımları

İkinci kompozisyon için Tablo 4.5’de bulunan değerlere karşılık gelen miktarlarda bileşen ilavesi ile çamur hazırlanmıştır. Buradaki değerler ilk kompozisyon ile tamamen aynı şekildedir. Bu kompozisyon ile şerit döküm malzeme üretimindeki tek fark (1. Kompozisyon ile üretime göre) karıştırma biçimidir. Diğer tüm parametreler sabit tutulmuştur.

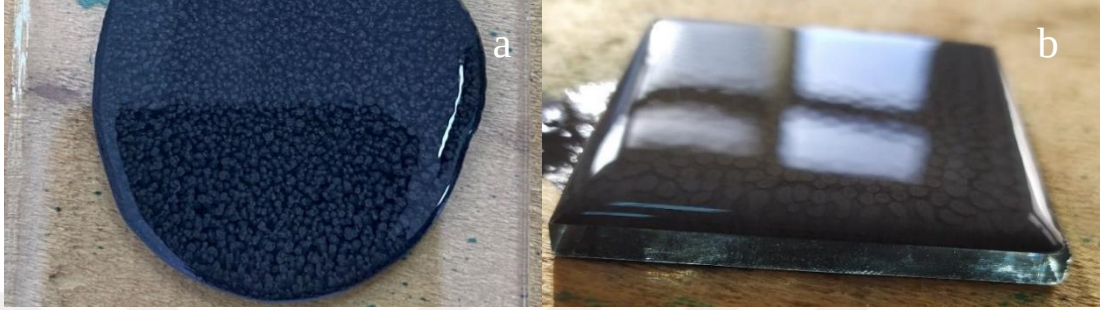
- Kompozisyondaki ilk problem olan bilya üzerine katı madde birikimi ile ilgili olarak %50 oranında düşürülüp, ağırlıkça %50 oranında ve 3mm çapında zirkonya bilya kullanılmış ve 30 dakika boyunca 500 dev/dk’da karışım yapılmıştır.
- Kompozisyondaki problemlerden ikincisi olan homojen olmayan çözelti ve aglomere olmuş toz sorununa çözüm olarak karıştırma yöntemini değiştirilmiştir. Bu nedenle tek eksenli dönen bilyalı değirmenden, yüksek enerjili ve farklı eksenlerde dönerek karışım sağlayan bilyalı değirmene geçiş yapılmıştır.

2. Kompozisyon ile hazırlanan numunelere yönelik gözlemler şu şekildedir:

Katı madde birikmesine karşın alınan önlem olarak bilya ve karıştırma süresinin azaltılması sonrası sıvı karışımında herhangi bir iyileşme görülmemiştir. Karıştırma yöntemindeki değişiklik de homojen bir sıvı oluşturma konusunda çözüm sunmamıştır. Sıvı karışım içerisinde katı partiküllerin dibe çökelediği ve çözücünün ise yüzeyde kaldığı görülmüştür. Ayrıca sıvının

viskozitesinin yeterince yüksek olmadığı düşünülmektedir. Döküm sonrasında kuruyan yüzeyde topaklanma eğilimi gösteren bölgeler olduğu gözlenmiştir.

Şekil 4.5’da görüldüğü üzere kaplama olmaksızın cam yüzeye döküm yapıldıktan hemen sonra sıvı yüzeyinde noktasal merkezlerden başlayarak bazı ayrışmalar meydana geldiği görülmüştür.



Şekil 4.5. Döküm sonrası kurumaya bırakılan numune yüzeyi görüntüleri: (a) üst görüntü, (b) yan görüntü

2. Kompozisyon sonrası gözlemlere dayalı olarak yapılması planlanan bazı iyileştirmeler öngörülmüştür. Karıştırma yöntemi olarak bilyalı değirmen kullanmak yerine manyetik karıştırıcı kullanılması planlanmıştır. Sıvı viskozitesinin arttırılmasına yönelik olarak katı madde miktarının arttırılması planlanmıştır. Döküm sıvısının homojen olmayışı ve döküm sonrası kuruma sürecindeki katı/sıvı ayrışmasından dolayı karıştırma süresinin uzatılması planlanmıştır.

c) 3. Kompozisyon İçin Uygulanan İşlem Adımları

3. kompozisyon için Tablo 4.5’te bulunan değerlere karşılık gelen miktarlarda bileşen ilavesi ile çamur hazırlanmıştır. Bu kompozisyonun öncekilerden farkı aşağıdaki gibidir;

- Ti64 miktarı ağırlıkça %70’e çıkarılmıştır. Çözücü olarak kullanılan EtOH ve ksilen yüzdeleri azaltılmıştır.
- Karıştırma yöntemi olarak manyetik karıştırıcı kullanılmıştır.
- Karıştırma süresi olarak 3 ve 24 saat olmak üzere iki farklı süre çalışılmıştır.
- Diğer tüm parametreler sabit tutulmuştur.

3. Kompozisyon ile hazırlanan numunelere yönelik gözlemler:

Karıştırma yöntemi olarak kullanılan manyetik karıştırma işleminde bilyalı değirmende yaşanan katı madde birikimi yaşanmamıştır. %65’ten %70’e

yükseltilen Ti64 oranının gözle görülür bir etki yaratmadığı söylenebilir. Karışımın 3 saat karışması ile 24 saat karışması sonucu elde edilen sıvı numunelerdeki ilk gözlem sonucunda herhangi bir farklılık görülmemiştir. Karışımın bekleme süresi uzadıkça katı madde çökmesi yaşandığı gözlenmiştir. Ti64 partiküllerinin sıvı içerisinde asılı kalma oranı düşüktür. Kuruma sonrası yüzeyde homojen olmayan bir yapı ortaya çıkmıştır (Şekil 4.6).



Şekil 4.6. Kuruma sonrası numuneye ait bir görüntü

Sıvı içerisindeki ayrışmanın henüz önlenemediği görülmüştür. Şekil 4.7’te verilen görselden anlaşılabacağı gibi yüzeyde hala ayrışmalar görülmektedir. Ancak bu ayrışmanın bekleme süresi arttıkça ortaya çıktığı farkedilmiştir. Anlık olarak fotoğraflanan yüzeyde kağıdın kenarına aniden sızan sıvının henüz bekleyip ayrışma olacak zamanı bulamayarak homojen bir görüntü verdiği gözlenmiştir. Sıvı içerisindeki ayrışmanın bir nedeninin de karışımda dağıtıcı özelliğinden yararlanılmak üzere kullanılan balık yağı olması ihtimali söz konusudur.



Şekil 4.7. Döküm sonrası yüzeyde görülen ayrışma

3. Kompozisyon sonrası gözlemlere dayalı olarak yapılması gereken bazı iyileştirmeler planlanmıştır. Karıştırma yöntemi olarak manyetik karıştırma ile devam edilmesine karar verilmiştir. Karıştırma süresinde herhangi bir farklılık gözlenmediği için 3 saat ile devam edilecektir. Ti64 miktarının %5 oranında arttırılması viskozitenin artması için gözle görülür bir etki yaratmadığından ve Ti64 partiküllerinin çökme eğilimi gösterdiğinden, plastikleştirici ve bağlayıcı oranını arttırmak planlanmıştır. Böylece artan plastikleştirici ve bağlayıcı miktarının hem viskozitesi, hem de yoğunluğu artacağı, dolayısıyla Ti64 ün askıda kalan madde miktarını da arttıracığı öngörülmektedir. Yüzey incelemeleri sonucunda belirli bir süre geçtikten sonra döküm sıvısının ayrışmaya başladığı ve kuruma sonrası yüksek derecede yüzey pürüzlülüğü olduğu tespit edilmişti. Bu problem üzerine düşünüldüğünde, dökülen numunenin atmosfere açık şekilde kurummasının olumsuz bir etki yaratmış olabileceği farkedilmiştir. Bunun önüne geçebilmek için, numuneyi hava akımından ve hızlı bir şekilde kurumaktan korumak amacıyla çok az buharlaşmanın mümkün olduğu bir kapalı ortam içerisinde kurutmak planlanmıştır. Böylece daha pürüzsüz bir yüzey elde edilmesi öngörülmektedir. Balık yağı kullanımının etkisini incelemek üzere bu malzemenin kullanımını sıfıra indirmek ve gelişmeleri gözlemlemek planlanmaktadır.

d) 4. Kompozisyon İçin Uygulanan İşlem Adımları

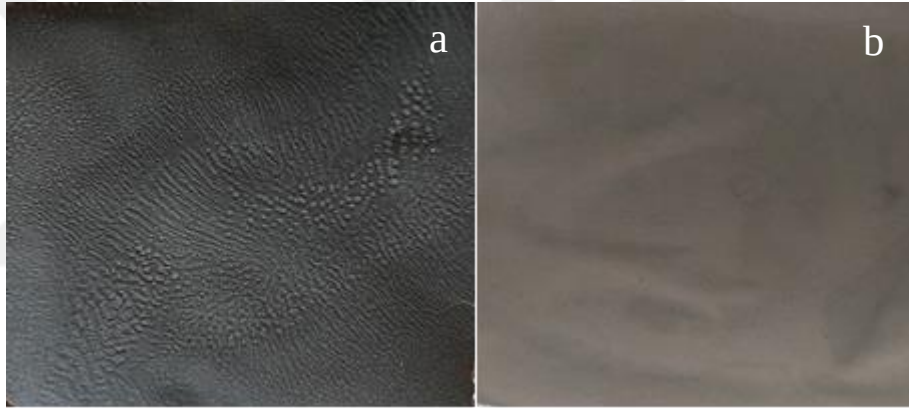
4. Kompozisyon için Tablo 4.5’de bulunan oranlarda bileşenler kullanılarak döküm sıvısı hazırlanmıştır. Bu kompozisyonun diğerlerinden farklılığı:

- Plastikleştirici ve bağlayıcı malzemelerin (PVB, PEG) oranları ilk 3 kompozisyona göre yaklaşık %50 oranında arttırılmıştır.
- Artan PVB ve PEG miktarına karşılık bu malzemeleri çözen EtOH ve ksilen çözücülerinin de yaklaşık olarak aynı oranda arttırılması gerekmiştir.
- Kullanılan malzemelerin ağırlıkça yüzdelik oranları hesaplandığında Ti64 tozunun %47’ye karşılık geldiği hesaplanmıştır.
- Kompozisyona balık yağı dahil edilmemiştir.
- Karışım yöntemi ve süresi önceki sistemde karar verildiği üzere manyetik karıştırıcıda 3 saat olarak ayarlanmıştır.
- Dökülen bazı numuneler hemen kapalı bir sistem içerisine alınarak çok yavaş bir şekilde çözücü uzaklaştırılması gerçekleştirilmiştir.

- Diğer bir kontrol sistemi olarak bazı numuneler ise atmosfere açık şekilde kurumaya bırakılmıştır.

4. Kompozisyon ile hazırlanan numunelere yönelik gözlemler:

Döküm sıvısının viskozitesi gözle görülür bir biçimde artış göstermiştir. Bu da sıvıyı döküm esnasında kontrol etmeyi kolaylaştırmıştır. Ayrıca Ti64 çökmesi azalmıştır, ancak yine de tamamen homojen denebilecek bir karışım elde edilememiştir. Balık yağı kullanımı ayrışmayı azalan yönde etkilememiştir. Açık alanda kurumaya bırakılan numunelerde aynı şekilde ayrışma ve pürüzlü bir yüzey görülmüştür (Şekil 4.8 a). Kapalı atmosferde kurumaya bırakılan numunelerde ise kuruma esnasında sıvı yüzeyde görülen ayrışma yok denecek kadar az indirgenmiştir. Kapalı atmosferdeki numunelerin yüzey pürüzlülüğü büyük oranda iyileşme göstermiştir (Şekil 4.8 b).



Şekil 4.8. Döküm sonrası farklı koşullarda kurumaya bırakılan numunelere ait görüntüler: (a) açık havada kurutma, (b) kapalı alanda kurutma

e) 5. Kompozisyon İçin Uygulanan İşlem Adımları

4. kompozisyon ile yapılan döküm numunedeki gözlemlere göre daha homojen bir sıvı elde etme ve partikül çökmesinin önlenmesi ihtiyacı için çözücü değişikliğine gidilmesi planlanmıştır. Burada öngörülen, ksilenin olumsuz etki yaratmış olabileceğidir. Ayrıca toksik etkinin de ortadan kaldırılması amacıyla ksilen yerine alternatif çözücü tercih edilmiştir. Viskozitenin artırılması için ise matris malzemenin yüzdesinin artırılması düşünülmüştür. Buna göre:

- Ağırlıkça %3 PVB, %7,5 ethanol ve %10 Metiletilketon (MEK) manyetik karıştırıcıda 60 dakika süre ile karıştırılmıştır.

- Ağırlıkça %2 PEG, %7,5 ethanol ve %10 MEK manyetik karıştırıcıda 60 dakika süre ile karıştırılmıştır.
- İki sıvı birbiri içinde karıştırılarak 3 saat süre ile karıştırılmıştır.

5. Kompozisyon ile hazırlanan numunelere yönelik gözlemler:

PEG ve çözücü/dağıtıcı karışımında çözünme sağlanamamıştır. PEG nin tamamına yakını çözünmemiştir. Bunun nedeni olarak çözücü/dağıtıcı miktarının yetersizliği öngörülmüştür. PVB çözünmesi gerçekleşmiştir. Homojen bir karışım elde edilemediği için döküm yapılmamıştır.

f) 6. Kompozisyon İçin Uygulanan İşlem Adımları

Bir önceki çamur karışımında homojen bir yapı elde edilememiştir. PEG'in tam olarak çözünmesi sağlanamamıştır. Bu problemleri çözmeye yönelik olarak kompozisyonda bir takım değişiklikler gerçekleştirilmiştir. Buna göre:

- Ağırlıkça %1 PEG, %10 ethanol ve %10 MEK manyetik karıştırıcıda 120 dakika süre ile karıştırılmıştır.
- Ağırlıkça %3 PVB, %10 ethanol ve %6 MEK manyetik karıştırıcıda 60 dakika süre ile karıştırılmıştır.
- İki karışım birbiri içerisinde 3 saat süre ile karıştırılmıştır.

6. Kompozisyon ile hazırlanan numunelere yönelik gözlemler:

PEG oranının azaltılması ve çözücü miktarının artırılmasına rağmen karışımında çözünme sağlanamamıştır. Nedenin çözücü/çözünen oranından kaynaklanmadığı, bunun yerine çözücü cinsi ile alakalı olduğu düşünülmektedir. PVB çözünmesi gerçekleşmiştir.

g) 7. Kompozisyon İçin Uygulanan İşlem Adımları

Karışımındaki PEG çözünmesi tam olarak sağlanamamıştır. Bunun giderilmesi amacıyla kompozisyonda yapılan değişiklikler şu şekildedir:

- Ağırlıkça %2 PEG, %5 ethanol, %5 ksilen ve %10 MEK manyetik karıştırıcıda 60 dakika süre ile karıştırılmıştır.
- Ağırlıkça %3 PVB, %5 ethanol ve %10 MEK manyetik karıştırıcıda 60 dakika süre ile karıştırılmıştır.
- İki karışım birbiri içerisinde 3 saat süre ile karıştırılmıştır.

7. Kompozisyon ile hazırlanan numunelere yönelik gözlemler:

Ksilen kullanımı %5 oranı ile yeniden başlatılmıştır. PEG nin çözünmeye başladığı ancak yine de tam olarak çözünmediği görülmüştür. Ksilen miktarının artırılıp, PEG miktarının azaltılması planlanmıştır. PVB çözünmesi gerçekleşmiştir.

h) 8. Kompozisyon İçin Uygulanan İşlem Adımları

PEG çözünmesinin tam olarak gerçekleşmesi için bu kompozisyonda bazı değişiklikler gerçekleştirilmiştir. Bunun sonucunda homojen bir çözelti elde edilerek döküm işlemi gerçekleştirilmiştir. Buna göre:

- Ağırlıkça %1 PEG, %5 ethanol, %10 ksilen ve %8 MEK manyetik karıştırıcıda 60 dakika süre ile karıştırılmıştır.
- Ağırlıkça %3 PVB, %5 ethanol ve %8 MEK manyetik karıştırıcıda 60 dakika süre ile karıştırılmıştır.
- İki karışım birbiri içerisine eklenerek %60 oranında Ti64 kademeli olarak eklenerek 3 saat süre ile karıştırılmıştır.
- Homojen karışım altlık üzerine dökülerek 24 saat kapalı ortamda oda sıcaklığında kurumaya bırakılmıştır.

8. Kompozisyon ile hazırlanan numunelere yönelik gözlemler:

Döküm sıvısındaki ayrışma büyük oranda azaltılmıştır. Sıvı viskozitesi göz kararı ile istenen değerdedir. PEG ve PVB tamamen çözünmektedir. Döküm malzeme kuruma sonrası homojen, pürüzsüz ve esnek bir yapıya sahiptir (Şekil 4.9).



Şekil 4.9. Şerit döküm ile üretilen Ti64 malzemenin kuruma sonrası yüzey görüntüsü

4.2.3. Döküm İçin Altlık Malzeme Seçimi

Şerit döküm yönteminde altlık malzeme seçimi için farklı altlık malzeme uygulamaları gerçekleştirilmiştir. Altlık yüzey olarak kullanılan malzemeler ve uygulamaya ilişkin sonuçlar şu şekildedir;

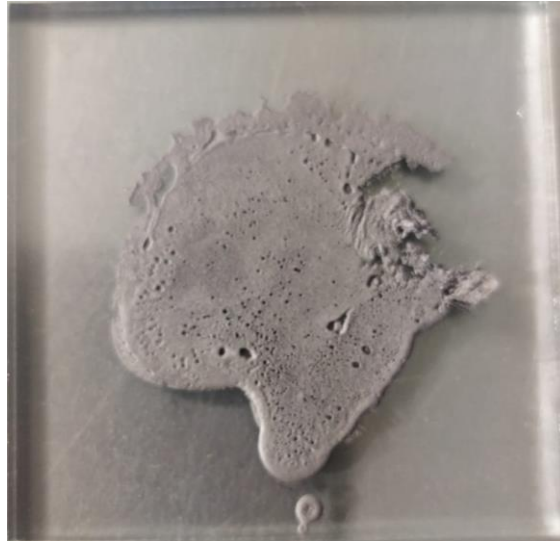
a) Cam Yüzey Uygulaması:

Şerit döküm için ilk uygulama yüzeyi olarak cam yüzey seçilmiştir. Döküm çamuru yüzeye uygulanıp yayıldıktan sonra tam kuruma sağlandığında ince levha yapısına ulaşması ve yüzeyden kolayca kalkması beklenen tabaka yavaşça sıyrılmaya çalışılmıştır. Ancak dökülen malzemenin yüzeyi iyi bir şekilde tuttuğu ve kolaylıkla sıyrılmadığı görülmüştür.

b) Silikon Kaplı Cam Yüzey Uygulaması:

Cam yüzey üzerine uygulanan malzemenin kuruma aşamasında cam yüzeye çok iyi tutunması ve yüzeyden sıyrılmaması gibi bir probleme yönelik olarak cam yüzeyin silikon malzeme ile kaplanması ve böylelikle yüzey geriliminin artırılmasıyla birlikte yüzeyin hidrofobik (yani su itici) özelliği artacaktır. Bu da döküm sıvısının yüzeye tutunmasını engelleyecektir.

Bu aşamada cam altlık üzerine silikon uygulanmış ve ardından döküm işlemi gerçekleştirilmiştir. Kuruma işleminin ardından yapılan gözlemlere göre Şekil 4.10'de görüldüğü üzere döküm sıvısı ile silikon tepkimeye girmiştir. Dolayısıyla kimyasal tepkime sonucu malzeme üzerinde negatif bir etki görülmüştür.



Şekil 4.10. Silikon kaplı cam altlık üzerine uygulanmış şerit döküm malzeme

c) WD40 Kaplı Cam Yüzey Uygulaması:

Cam altlık üzerine yağlayıcı etkisinden dolayı ticari adıyla WD40 olarak bilinen kimyasal malzeme uygulanmıştır. Ancak bu numunedeki sonuç da beklenen etkiyi göstermemiş, yüzeye tutunmayı azaltmamıştır (Şekil 4.11).

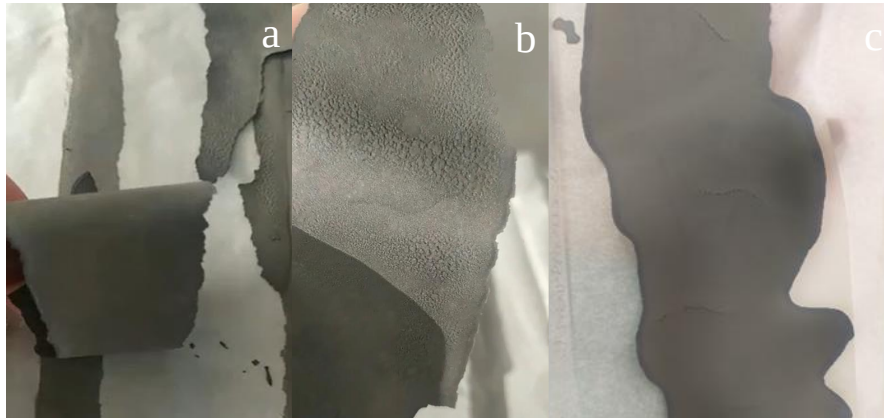


Şekil 4.11. WD40 kaplı cam altlık üzerine uygulanmış şerit döküm malzeme

d) Silikonize Kağıt Uygulaması:

Altlık olarak kullanılan silikonize kağıt, fırın kağıdı ismiyle bilinen ve aslında silikon kaplı selüloz malzeme yapısında olan pişirme kağıdıdır. Altlık olarak kullanılan fırın kağıdı üzerinde kurutulan numunelerin yüzeyden kolayca sıyrıldığı ve esnek bir yapıda olduğu görülmüştür. Ancak silikon kaplı kağıt malzemenin döküm sıvısı ile bir miktar nemi içine çektiği ve dolayısıyla genişterek bombeli bir yüzey oluşturduğu görülmüştür. Buradaki neden, fırın kâğıdının neme karşı dayanıksız olması ve genişlemesidir. Buna ek olarak genişleme farkından dolayı numunede çatlakların neden olduğu deformasyonlar da görülmektedir (

Şekil 4.12).



Şekil 4.12. Silikonize kağıt üzerine dökülen numune görüntüleri: (a) şerit katmanının elastik yapısı, (b) yüzeydeki homojen olmayan görüntü ve (c) çatlak oluşumu

e) Mylar Film Uygulaması:

Son uygulama yüzeyi olarak Mylar film kullanımı gerçekleştirilmiştir. Mylar film sayesinde genleşme problemi de ortadan kaldırılarak yüzeyden kolay sıyrılan bir şerit tabaka elde edilmiştir (Şekil 4.13).



Şekil 4.13. Mylar film altlık üzerinde üretilmiş Ti64 şerit malzeme

4.2.4. Grafen Takviyesinin Optimizasyonu

Şerit döküm prosesinde döküm sıvısı olarak optimize edilen sıvı, bu aşamada farklı oranlarda toz formda Ti64 matris içerisine grafen katkısı yapılarak şerit kompozitlerin üretiminde kullanılmıştır. Bu katkılandırma çalışması yapılırken grafen miktarının fiziksel ve mekanik özelliklere olan etkisinin incelenmesi hedeflenmiştir.

Grafen katkısının oranları Ti64'e göre ağırlıkça %0,15, %0,30 ve %0,45 olarak belirlenmiştir. Katkı oranlarına ait çalışma yapılırken katkı miktarları optimize edilen döküm sıvısı üzerinden Ti64'ün ağırlıkça %60 olduğu toz kısım dikkate alınmıştır. Buna göre Tablo 4.6'da ağırlıkça %60 Ti64'ün yine ağırlıkça %0,15, %0,30 ve %0,45 oranlarına karşılık gelen grafen miktarları verilmiştir.

Tablo 4.6. Ağırlıkça Ti64 ve grafen oranlarına karşılık bileşen kodları

Bileşen Kodu	0-0		15-0		30-0		45-0	
Bileşen	Ti64	Grafen	Ti64	Grafen	Ti64	Grafen	Ti64	Grafen
Ağırlıkça Yüzde	100	0	99,85	0,15	99,70	0,30	99,55	0,45

Ti64 ile grafen tozları bilyalı değirmende karıştırıldıktan sonra döküm sıvısı hazırlama süreci içerisindeki uygun adımda karışıma dahil edilmiştir. Ardından bütünüyle şerit döküm prosesi uygulanmıştır.

Ti64 matris malzeme ile grafen takviyesi üzerine yapılan bütün kompozisyonlar optimum koşullarda presleme ve sinterleme işlemlerine tabi tutulmuştur. Bu süreç sonunda fiziksel ve mekanik testler ile içyapı incelemeleri için hazır hale gelmiştir. Bu aşamada toplam sekiz farklı numune türü planlanmıştır.

Tablo 4.7’de verilen sekiz farklı numuneye ait kodlar grafen takviyesinin türü ve oranını göstermektedir. Burada sol hücre toz içerisine yapılan grafen katkısını ifade etmektedir. Sağ hücre ise katmanlar arasına yapılan grafen kaplamasını ifade etmektedir.

Tablo 4.7. Bileşen kodları ve grafen ilave durumu

Bileşen Kodu	Toz İçine Grafen İlavesi (ağırlıkça%)	Yüzey Grafen Kaplaması
0-0	Yok	Yok
0-G	Yok	Var
15-0	0,15	Yok
15-G	0,15	Var
30-0	0,30	Yok
30-G	0,30	Var
45-0	0,45	Yok
45-G	0,45	Var

4.2.5. Sprey Uygulaması İçin Çözücü Sıvının Optimizasyonu

Sprey kaplama için, grafen tozunun kimyasal bir tepkimeye girmeksizin homojen olarak çözüleceği ve çözücü sıvı içerisinde asılı kalma davranışının yüksek olacağı bir sıvı tercih edilmelidir. Bu sebeple çözücü sıvı konumundaki üç farklı sıvı ile çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.14’de görüldüğü gibi; etanol, etanol - su ve izopropanol sıvılarının çözücü olarak kullanıldığı üç farklı çözelti düzeneği kurulmuştur.

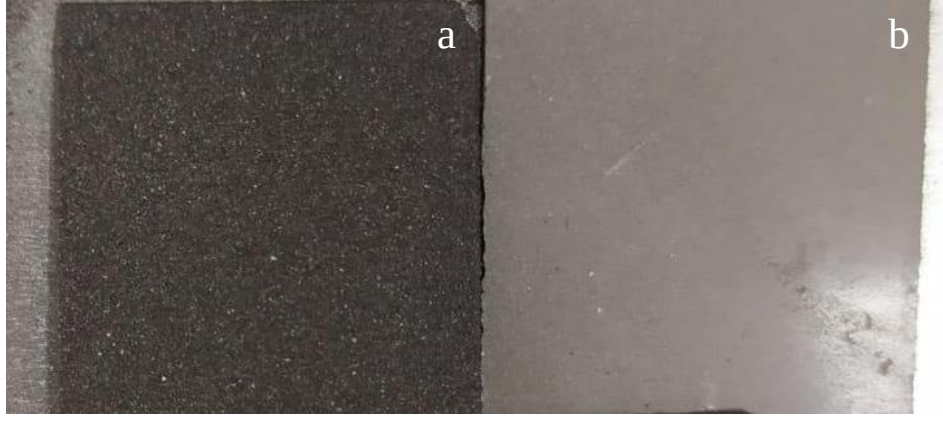


Şekil 4.14. Sprey kaplama çözeltilerinin katı madde çökeltme davranışları

Ağırlıkça %5 oranında grafen tozu eklenerek ultrasonik karıştırıcıda karıştırılan çözeltiler üç saat süreyle beklemeye alınmıştır. Bekleme süresi sonunda çökeltme miktarlarına bakılarak en az çökeltme olan karışım 2-propanol+grafen karışımı olarak belirlenmiştir.

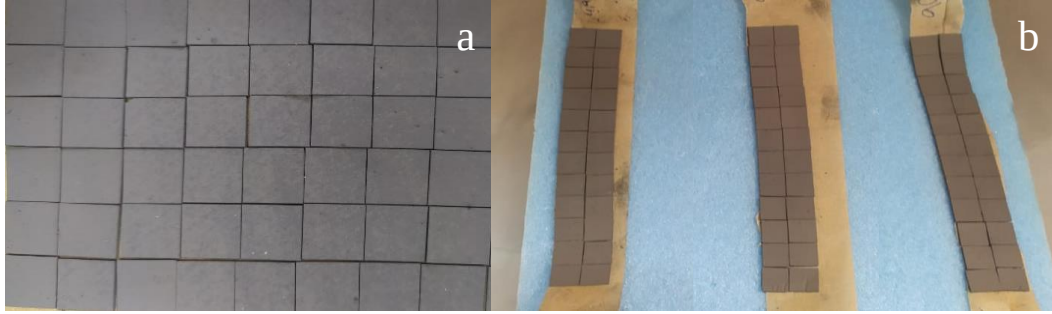
4.2.6. Kaplama Yapılacak Grafen Miktarının Optimizasyonu

Grafen takviyesinin miktarı belirlenmek üzere kaplama öncesi ve sonrası ağırlık farklarının hesaplanması yöntemi izlenmiştir. Takviye edilen grafen miktarı spreyci uygulamasının süresine bağlı olarak ağırlıkça değişkenlik gösterecektir. Kaplama için 24 adet numuneden oluşan üç set hazırlanmıştır. Her set için farklı sürelerde kaplama uygulanmıştır. Şekil 4.15’de grafen kaplanmış (a) ve kaplanmamış (b) şeritlerin yüzeylerine ait görüntüler verilmiştir. Elektrosprey kaplama uygulanırken grafenin 2-propanol içerisinde homojen bir şekilde dağılması ve uygulama aşamasında eşit miktarda partikül atılması için deney düzeneği hassas şekilde ve her denemede standart özelliklerde hazırlanmıştır. Bunun için spreyci konisinin gördüğü açı tamamen numune yüzeylerini kapsamaktadır. Uygulama atmosfer koşullarından minimum düzeyde etkilenmek amacıyla kapalı bir çekir ocağ içerisinde gerçekleştirilmiştir. Görüntülerden de anlaşılacağı üzere, elektrosprey yöntemi ile numune yüzeyine oldukça homojen bir şekilde grafen kaplaması yapmak mümkündür.



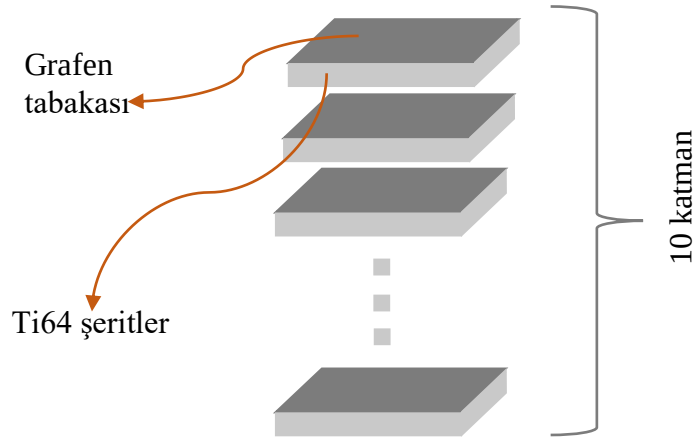
Şekil 4.15. Ti64 şerit malzemeler: (a) grafen kaplaması uygulanmış, (b) grafen kaplaması uygulanmamış

Şekil 4.16'deki numune gruplarının her biri 24 adet dilimlenmiş numuneden oluşmaktadır. Sprey kaplama öncesinde ve sonrasında her grup ağırlık ölçümüne tabi tutulmuştur.



Şekil 4.16. Kaplama öncesi Ti64 şerit numuneler: (a) dilimlenmiş numuneler, (b) 24'lü dilimden oluşan kaplama setleri

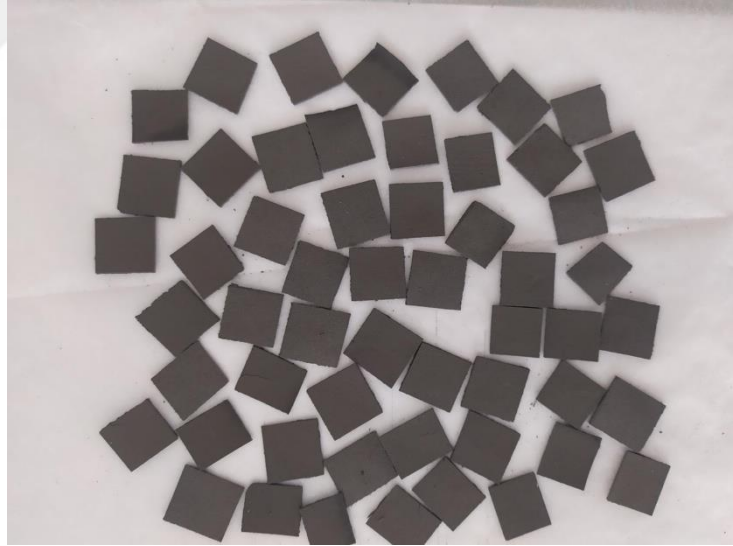
Ti64 katmanların şerit döküm sonrası dilimleme, ağırlık ölçümü, kaplama işlemi ve kaplama sonrası ağırlık ölçümü uygulanmıştır. Kaplama süresi olarak çalışılan 30, 60, 90 saniyelik sürelerin sonunda her serinin numuneleri 10 katmanlı yapı oluşturacak şekilde dizilmiştir. Şekil 4.17'da kaplama yapılmış malzemelerin katmanlı yapısını şematize eden bir görsel verilmiştir.



Şekil 4.17. Grafen kaplanmış şerit katmanları

4.2.7. Dilimleme İşlemi

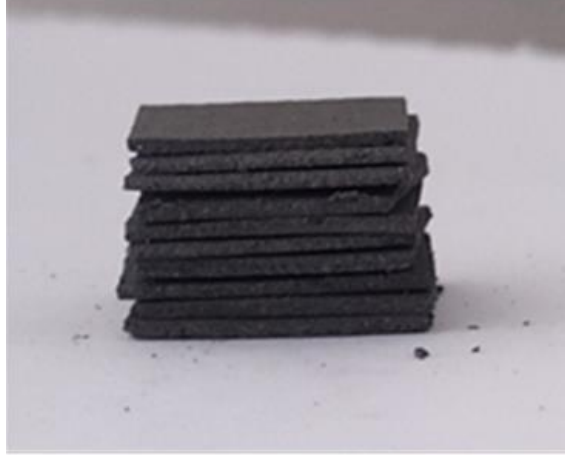
Döküm ve kuruma işlemleri uygulanan Ti64 şerit malzemeler $10 \times 10 \text{ mm}^2$ boyutlarında kareler şeklinde dilimlenmiştir (Şekil 4.18). Şerit malzemenin kalınlığı 0,8 mm olarak ölçülmüştür.



Şekil 4.18. Dilimlenmiş Ti64 numuneler

4.2.8. Katmanlama İşlemi

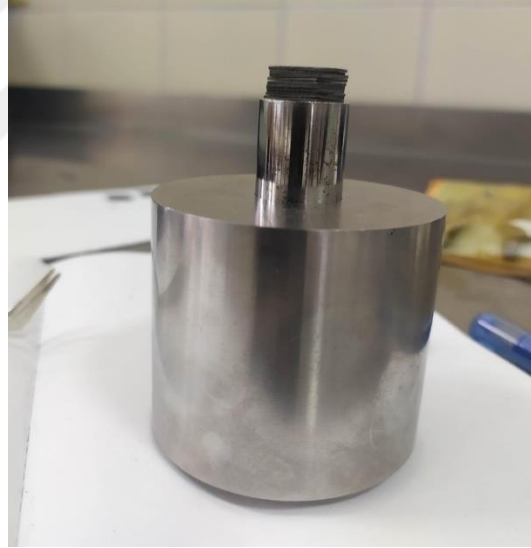
Uygun ölçülerde dilimleme işlemine tabi tutulan ince katmanlı malzemeler bu aşamada çok katmanlı şekilde üst üste dizilecektir. Her bir katman kalınlığı yaklaşık olarak 0,8 mm olmak üzere 10 katmanlı olarak dizilim gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.19). Presleme öncesi yaklaşık toplam kalınlık 8 mm dir.



Şekil 4.19. Katmanlı olarak dizilmiş Ti64 şerit malzeme

4.2.9. Presleme İşlemi

Katmanlama işleminin ardından, Şekil 4.20’de verilen dairesel kesitli kalıp yardımıyla presleme işlemi yapılmıştır. Presleme işlemi için Makine Mühendisliği laboratuvarında bulunan 25 tonluk elektro hidrolik pres kullanılmıştır (Şekil 4.21).

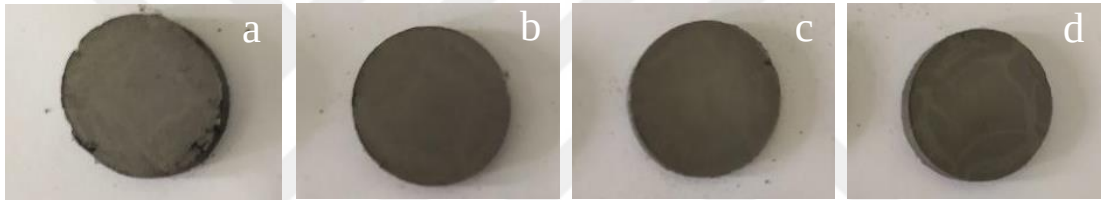


Şekil 4.20. Dairesel kesitli kalıp

Presleme işlemi için dört farklı yük uygulanmıştır. Bu yükler altında hazırlanan çok katmanlı Ti64 numunelerin yoğunluk özelliklerine göre optimum yük belirlenmiştir. Pres göstergesi olarak bar cinsinden basıncı veren bir barometre bulunmaktadır. Numunelere 20, 40, 60 ve 80 bar değerinde basınçlar uygulanmıştır. Şekil 4.22’te numunelere ait görüntüler verilmiştir.



Şekil 4.21. Elektro hidrolik pres: (a) genel görünüm, (b) numunenin preslenme aşamasındaki görünümü



Şekil 4.22. Farklı basınçlarda preslenen katmanlı Ti64 numuneler: (a) 20 bar, (b) 40 bar, (c) 60 bar ve (d) 80 bar altında preslenmiş numuneler

4.2.10. Isıl İşlem Uygulamaları

Şerit döküm yöntemiyle üretilerek katmanlı yapı elde etmek üzere preslenen numunelere bir takım ısıtma işlemleri uygulanmıştır. İlk olarak organik maddelerin uzaklaştırılması amacıyla gerçekleştirilen birinci ısıtma evresi ve ardından da sinterleme süreci gerçekleştirilmiştir. Sinterleme işlemi için kapalı bir sistemden oluşan tüp fırın içerisinde argon gazı atmosferinde çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Sinterleme işlemine ait optimum süre ve sıcaklık çalışmaları daha önce aynı laboratuvar şartlarında gerçekleştirilen çalışmadan alıntılanmıştır (Sayın, 2020).

Sayın vd, yaptıkları bu çalışmada;

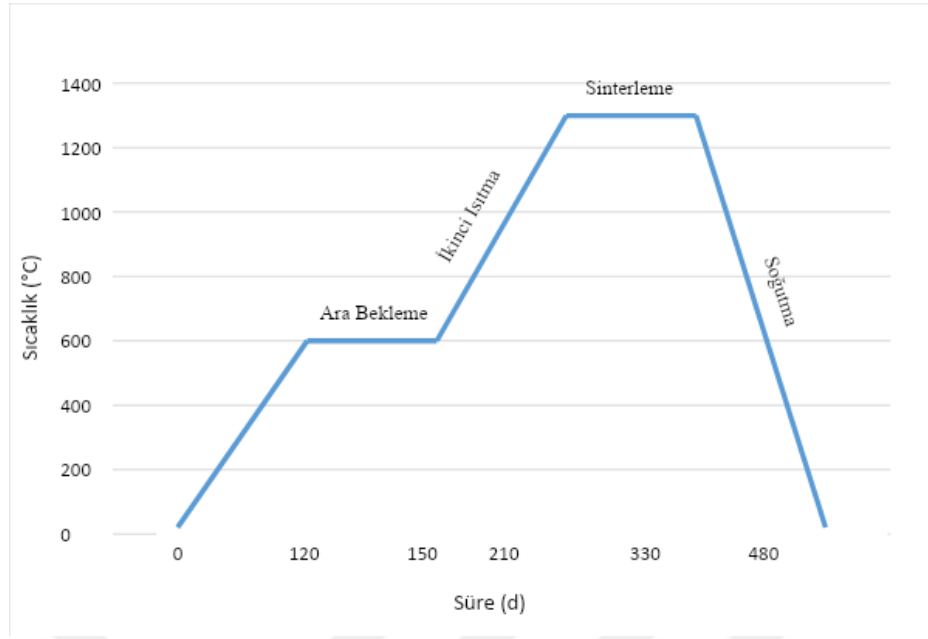
- 1200°C sıcaklıkta 60, 120, 180 dakika sinterleme işlemleri uygulamışlardır. En uygun sürenin seçilmesi için sinterlenen numunelerin yoğunluklarına bakılmıştır. 120 dakika sinterlemeye maruz bırakılan numune 3,9 g/cm³ ile en yüksek yoğunluk değerini vermiştir.

- Sıcaklık çalışması içinse 120 dakika sinterleme süresi sabit tutularak 1000°C, 1100°C, 1200°C ve 1300°C sıcaklıklarda sinterleme yapılmıştır. Burada ise en uygun sinterleme sıcaklığının seçilmesi için yine yoğunluk değerlerine bakılmıştır. 1300°C’de 120 dakika sinterlenen numuneler 4,12 g/cm³ ile en yüksek yoğunluk değerini vermiştir.
- Farklı sinterleme sıcaklığına maruz bırakılan numunelerin Vickers sertlik ölçümleri yapılmış ve 408,88 HV0,1 değeri ile en yüksek sertlik 1300°C’de sinterlenen numuneye ait olduğu gözlenmiştir.
- Son olarak maksimum basma dayanımı değerleri de ölçülerek 1519 MPa ile en yüksek basma dayanımına sahip numunenin yine 1300°C’de sinterlenen numune olduğu görülmüştür.

Sinterleme işleminin süre ve sıcaklık değerleri bu çalışmaya referans olarak alınmış ve 1300°C’de 120 dakika sinterleme işlemi yapılmıştır. Bunun yanında üretilen şerit döküm numunelerde yöntemden kaynaklı olarak organik maddeler bulunmaktadır. Bunların ısıtma işlem aşamasında uzaklaştırılması söz konusu olmaktadır. Bu nedenle literatürden referans alınarak proses tüm aşamalarıyla aşağıdaki işlem adımları takip edilerek gerçekleştirilmiştir (

Şekil 4.23).

1. 120 dakikada oda sıcaklığından (20°C) 600°C’ye kadar ısıtma işlemi (Birinci Isıtma Evresi)
2. 30 dakika süre ile 600°C’de bekleme işlemi (Ara Bekleme Evresi-Organiklerin Uzaklaştırılması)
3. 60 dakikada 600°C’den 1300°C’ye kadar ısıtma işlemi (İkinci Isıtma Evresi)
4. 120 dakika süre ile 1300°C’de bekleme işlemi (Sinterleme Evresi)
5. 150 dakikada oda sıcaklığına kadar kontrollü soğutma işleminden oluşmaktadır.



Şekil 4.23. Grafen takviyeli Ti64 kompozit malzeme üretilimindeki ısıtım işlemi prosesi

4.2.11. Kırma, Bakalite Alma ve Parlatma İşlemi

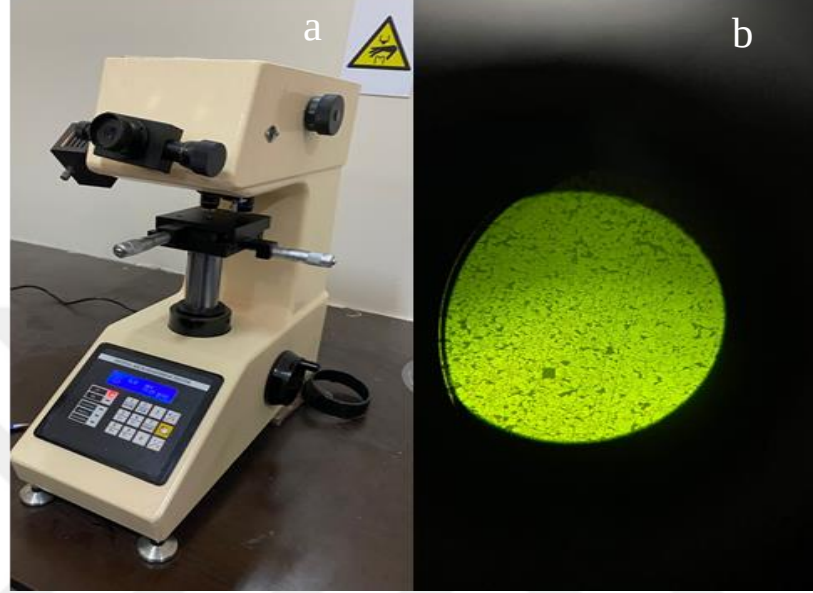
Sinterleme işlemi sonrası numunelerin taramalı elektron mikroskopunda kırık yüzey görüntüsü alınması amacıyla kırma işlemi uygulanmıştır. Sertlik ölçümü gerçekleştirmek üzere her seriye ait numuneler için ölçüm öncesi hazırlık amacıyla bakalite alma ve parlatma işlemi uygulanmıştır. Parlatma işlemi için Malzeme Mühendisliği Bölümü laboratuvarında bulunan parlatma cihazı kullanılmıştır.

4.2.12. Sertlik Ölçme İşlemi

Bakalite alma ve parlatma işleminden geçirilen numunelere iki farklı süreç durumunda sertlik ölçüm işlemi uygulanmıştır. Öncelikle presleme işleminde sıkıştırma basıncının sertlik değerine etkisinin incelenmesi için Ondokuz Mayıs Üniversitesi Malzeme Mühendisliği Laboratuvarında bulunan sertlik ölçüm cihazı ile mikro Vickers sertlik ölçümleri gerçekleştirilmiştir. İkinci süreçte ise, grafen takviyesinin hem ara yüzeyde hem de döküm sıvısında yapılan katkısının sertlik özelliğine olan etkisinin incelenmesi amacıyla SAMPA Otomotiv San. ve Tic. A.Ş. firmasına ait Ar-Ge laboratuvarında ölçümler gerçekleştirilmiştir.

Presleme işlemi optimizasyonu sürecinde 20, 40, 60 ve 80 bar basınç uygulanarak sıkıştırılan numunelerin nasıl bir sertlik davranışı sergileyeceğini ortaya koymak ve en yüksek sertliğe sahip numuneye uygulanan basıncı saptamak amacıyla

numunelere 100 gr yük altında, 10 s süre ile mikro Vickers sertlik ölçüm işlemi yapılmıştır. Ölçüm işlemleri gerçekleştirilirken her numune için yüzeydeki farklı bölgelerden olmak üzere beş noktadan uygulanmıştır. Bulunan değerlerin ortalaması alınarak çıkan sonuçlar irdelenmiştir. Sertlik ölçümüne ait yüzey görüntüsü ve sertlik ölçüm cihazına ait görüntü Şekil 4.24’da verilmiştir.



Şekil 4.24. Sertlik ölçüm cihazına ait görüntüler: (a) cihazın genel görünümü, (b) sertlik ölçümü yapılan yüzeyin mikroskobik görüntüsü

4.2.13. Aşınma Test İşlemi

Grafen takviyesinin Ti64 kompozit malzemedeki aşınma dayanımına etkisinin incelenmesi amacıyla aşınma testleri gerçekleştirilmiştir. Bunun için Ondokuz Mayıs Üniversitesi Makine Mühendisliği Laboratuvarında bulunan aşınma deney düzeneği kullanılmıştır (Şekil 4.25).



Şekil 4.25. Aşınma test cihazına ait bir görüntü

Belirli bir yük altında ve sabit bir dönme hızı uygulanarak, belirli mesafe boyunca aşındırıcı disk ile malzeme arasındaki sürtünme durumunda meydana gelen aşınma durumu incelenerek kompozit malzemelerin aşınmaya karşı gösterdiği direnç gözlenmiştir. Uygulanan yük $P=10$ N, dönüş hızı $n=200$ dev/dk ve test süresi (t) 20 dk olarak belirlenmiştir. Buradan da aşındırıcı disk yarıçapı (r) 20 mm olarak kullanıldığında ilerleme mesafesi $L=500$ m olarak hesaplanır (Eşitlik 4.1).

$$L=2\pi r \times n \times t \quad (4.1)$$

Bu parametreler altında aşınma test cihazına bağlanan numuneler aşınma testine maruz bırakılmıştır. Test uygulanmadan önce ağırlığı ölçülerek (M_1) kayıt altına alınan numunelere test sonrası da ağırlık ölçümü uygulanarak (M_2) kayıt altına alınmıştır. Her numune için bu ölçümler yapıldıktan sonra numunelerin kütle kaybı (ΔM) değerleri hesaplanmıştır (Eşitlik 4.2).

$$\Delta M = M_1 - M_2 \quad (4.2)$$

Hacim (V) değerleri hesaplanmak üzere silindirik numunelerin ilk durumdaki ayrıtları (yarıçap, r ve kalınlık, h) da ölçülerek kayıt altına alınmıştır. Eşitlik 4.3 ile bulunan ilk hacim değerleri kullanılarak özkütle (ρ) değerleri de hesaplanmıştır (Eşitlik 4.4).

$$V = \pi r^2 \times h \quad (4.3)$$

$$\rho = M_1 / V \quad (4.4)$$

Elde edilen bu fiziksel parametreler kullanılarak aşınma testi sonrası numunelerde meydana gelen aşınma miktarları (aşınan hacim, ΔV) ve buna bağlı olarak aşınma oranları (W) Eşitlik 4.5 ve Eşitlik 4.6 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\Delta V = (M_1 - M_2) / \rho \quad (4.5)$$

$$W = \Delta V / (PL) \quad (4.6)$$

4.2.14. Termal İletkenlik Ölçme İşlemi

Grafen tozu ilavesi ile ve grafen ilavesiz olarak şerit döküm prosesiyle üretilen Ti64 matrisli şerit malzemeler ikinci olarak her bir kompozisyona spreyci yöntemiyle grafen kaplaması yapılarak ve kaplamasız olarak ayrı ayrı hazırlanmıştır. Presleme

işlemine tabi tutulduktan sonra ısıtma işlem sürecinin de tamamlanmasının ardından gerekli testler için hazır hale gelmiştir.

Termal iletkenlik, malzemelerin ısıyı iletme kabiliyetini anlatan fiziksel bir niceliktir. Isıl iletkenlik katsayısı (k) ile ifade edilir. Birimi W/mK 'dir. Üretilen numunelere ait termal iletkenlik davranışının incelenmesi bu çalışmanın öncelikli hedeflerinden biridir. Havacılık sektöründen otomotiv sektörüne, medikal uygulamalardan elektronik uygulamalara kadar birçok alanda kullanılan Ti64 alaşımının termal iletkenlik davranışı çoğu zaman önemli bir özellik olarak karşımıza çıkmaktadır. Burada gerçekleştirilmek istenen ise, termal iletkenlik özelliği Ti64'ten (Ti64'ün termal iletkenliği: $6,7 W/mK$) yüksek olan grafenin (grafenin termal iletkenliği: $4840-5300 W/mK$) takviyesi sayesinde daha yüksek termal iletkenlik özelliğinin Ti64'e kazandırılmasıdır.

Termal iletkenlik davranışının incelenmesi amacıyla ısıtıcı tabla üzerinde belirli sıcaklık değerlerinde ve belli sürelerde ısıya maruz bırakılan numunelerin termal kamera aracılığıyla görüntülerinin izlenmesi gerçekleştirilmiştir. Numune yüzeylerinin parlatılmasının ardından termal macun yardımıyla altlık olarak kullanılan silikonize kağıt üzerine yapıştırılmıştır. Termal macun kullanılmasının amacı, mikro düzeyde pürüzlülük olma ihtimaline karşı numune yüzeylerinin ısıtıcı tablaya tam olarak temas etmesinin sağlanmasıdır. Şekil 4.26'de verilen Dow Corning 340 termal macun kullanılmıştır. Çinko oksit ve polydimetilsiloksan içeriğine sahip bu termal macun yüksek termal iletkenlik, düşük akma özelliği ve yüksek kararlılıkta sıcaklık dağılımına sahiptir. Bu sayede malzeme tabanında yüksek sıcaklıklarda dahi akmadan sabit durabilmekte ve ısıyı stabil olarak hızlı bir şekilde dağıtmaktadır.



Şekil 4.26. Dow Corning 340 termal macun

Termal kamera olarak Ondokuz Mayıs Üniversitesi Makine Mühendisliği Laboratuvarında bulunan TESTO 881 marka/model kamera kullanılmıştır (Şekil 4.27). Numunelerin ısıtılması amacıyla yine aynı laboratuvarda bulunan ısıtıcı manyetik karıştırıcı cihazı kullanılmıştır. Sıcaklık değerleri, 50°C'den başlanarak 10°C'lik periyodik artışlarla 200°C'ye kadar olan geniş bir aralık şeklinde seçilmiştir. Ölçümün gerçekleştirilmesi için hazırlanan numuneler, ölçüm sıcaklığına kadar ısıtılmış olan ısıtıcı tabla üzerine koyulmuştur. Belirlenen sıcaklık değerlerinde anlık olarak görüntüler alınmıştır. Görüntünün alınacağı sıcaklık değerine ulaşan ısıtıcı yüzey üzerine bırakılan numunelerden daha sonra 10 saniye süre ile beklenerek görüntüler alınmıştır. Bekleme süresinin sonunda alınan görüntülerde, her bir numunenin 10 saniyede alt yüzeyden üst yüzeye doğru gerçekleşen ısı transfer kabiliyeti ortaya koyulmaktadır. Bunun sayısal verilere dönüştürülmesi ve renk skalasındaki görsellerin elde edilebilmesi için kamera ile alınan görüntülerin bilgisayar yazılımı aracılığıyla işlenmesi gerekmektedir.



Şekil 4.27. TESTO 881 termal kamera

Kamera yardımıyla alınan görüntüler daha sonra işlenmek üzere hafızaya kaydedilmektedir. Görüntülerin işlenmesi TESTO tarafından geliştirilen özel yazılım aracılığıyla gerçekleştirilmektedir. Bunun için bilgisayar ortamında çalıştırılan TESTO uygulaması kurulumu yapılmıştır. Görüntülerin işlenmesi, istenen görüntü yüzeylerinde odak noktaları seçilerek termal renk değişimi skalasından sıcaklık değerine karşılık gelen değerlerin tabloya otomatik olarak atanmasıyla tamamlanır. Buradaki sıcaklık ve renk değişimi skalası özel aralıklarda belirlenebilir. Renk değişiminin belirgin olarak görülebilmesi amacıyla ilk skala 25°C-100°C aralığında seçilmiştir. 100°C'nin üzerine çıktığında skala 50°C-150°C ve 150°C'nin üzerine çıktığında ise skala 50°C-200°C aralığına ayarlanmıştır. Burada her bir numunenin üst yüzeyinde ölçülen sıcaklıklar kayıt altına alınmıştır. Farklı grafen oranlarına sahip

Ti64 kompozitlerin 10 saniyelik bekleme sürelerinin sonunda ısıtıcı yüzeydeki ısıyı alt yüzeyden üst yüzeye transfer etme kabiliyetleri ortaya koyulmuştur. Örneğin; ısıtıcı yüzey 50°C iken yüzeye yerleştirilen numunelerin 10 saniye sonunda üst kısımlarındaki sıcaklıklar termal kamera ile tespit edildiğinde numune kodlarına göre sırasıyla; 31,2°C, 36,5°C, 30,2°C, 35,9°C, 41,6°C, 42,7°C, 44,5°C, 42,5°C olarak değerler kaydedilmiştir. Bu ölçüm 50°C ile 200°C arasındaki her 10°C'lik artışlarla tekrarlanmıştır.

4.2.15. Taramalı Elektron Mikroskobu ile Mikroyapı Analizi

Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM), numune yüzeyini elektron demetiyle tarayarak görüntü oluşturan bir cihazdır. Elektronlar, numunenin atomlarıyla etkileşerek yüzeyin şekli ve bileşimi hakkında bilgi sağlarlar. Elektron demeti, numune yüzeyini tarayarak elde edilen sinyallerle eşleştirilerek görüntü oluşturur, bu da yüksek çözünürlük sağlar, 1 nanometreden daha küçük detayları görebilir. Standart SEM cihazları genellikle vakum altında çalışır ve kuru ve iletken yüzeyler için uygundur. Ancak, çevresel taramalı elektron mikroskopları gibi özel cihazlar düşük vakumda, nemli koşullarda ve değişen sıcaklıklarda çalışabilir.

Bu tez çalışmasında, kompozit malzemelerin kırık yüzeylerinin görüntülenmesi ve ayrıca elemental kompozisyonlarının belirlenmesi için OMÜ Karadeniz İleri Araştırma Merkezi'nde (KİTAM) bulunan bir taramalı elektron mikroskobu (Jeol marka JSM7001F modeli) kullanılmıştır. Mikrokoba ait görüntü Şekil 4.28'de verilmiştir.



Şekil 4.28. Taramalı elektron mikroskobuna ait bir görüntü

SEM'de, numune üzerine odaklanmış bir elektron demeti gönderilerek analiz yapılır. Cihaz üç ana bölümden oluşur: optik kolon, numune ve görüntüleme sistemi. Optik kolon, elektron demetinin kaynağı olan elektron tabancası, elektronları hızlandırmak için yüksek gerilim uygulanan anot plakası, ince elektron demeti elde etmek için manyetik mercekler ve numune yüzeyini tarayan tarama bobinleri içerir. Görüntüleme sistemi ise, elektron demeti ile numune arasındaki etkileşim sonucunda ortaya çıkan sinyalleri toplayan dedektörlerden oluşmaktadır.

Mikroskop ile ayrıca üretilen kompozit numunelerin üzerinde Enerji Dispersiv Spektrum (EDS) analizi yapılarak elemental kompozisyonlar da belirlenmiştir.



5. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu tez çalışmasında Ti64 matris malzeme içerisine grafen takviyesi yapılarak şerit döküm yöntemiyle çok katmanlı kompozit malzeme üretimi gerçekleştirilmiştir. Bunun için şerit döküm ünitesinin tasarımı ve imalatı da yine tez kapsamında yapılmıştır. Cihaz kullanılarak üretilen numuneler ısıtılma işleminden geçirilmiş ve bir takım fiziksel özellikleri ve mekanik davranışları analiz edilerek sonuçları tartışılmıştır. Yapılan bütün işlemlerin bulguları ise bu kısımda tartışılmıştır.

5.1. Şerit Döküm Ünitesinin Tasarım ve İmalatının Analizi

Bu çalışmada şerit döküm yöntemiyle Ti64 şerit kompozitlerin üretilmesi için şerit döküm ünitesi tasarımı ve montajı gerçekleştirilmiştir. Kullanıma uygun şekilde ve uygun boyutlarda üretilen düzenekte bütün döküm işlemleri uygulanmıştır. Döküm ünitesi laboratuvar ortamında düşük ebatlardaki şeritlerin üretilmesi için yeterli seviyededir. Hareketli bir alt parça ile sabit bir sıyrıcı bıçak (Doctor Blade) arasında dökülen sıvı malzemenin altlık üzerine yayılması ve düzlenmesi şeklinde çalışmaktadır. Hareketli düzlem, kayar bir kızak mekanizması üzerinde motor gücüyle ilerleyen yapıdan oluşmaktadır. Farklı hızlarda ilerleme opsiyonu eklenen makinede aynı zamanda istenen kalınlıkta şerit üretimi için bıçak ayarı yapılabilmektedir. Kontrol ünitesi üzerinden gerekli ayarlar yapılabilirken aynı zamanda telefon uygulaması aracılığıyla uzaktan erişim ile de kontrol sağlanabilmektedir. Ortam koşullarından (havadaki kirlilik, rüzgar vb.) etkilenmemesi için, kurumaya bırakılan numuneyi koruyan bir kapalı haznesi mevcuttur.

5.2. Şerit Döküm Çamurunun Optimizasyon Sonuçlarının Analizi

Şerit döküm sıvısının hazırlanması aşamasında kimyasal ve fiziksel olarak birbiriyle tepkimeye girmeyen, birbirinin üstün özelliklerini baskılamayan ve en uygun viskozitede bir karışım oluşturmak için Ti64 ve grafenden oluşan toz karışım, çözücüler (ethanol, ksilen, metiletilketon), bağlayıcılar ve plastikleştiriciler (polivinil bütiral ve polietilen glikol) uygun koşullarda karıştırılmıştır. Karışım oluşturulurken göz önünde bulundurulacak parametreler; homojen bir çamur elde edilmesi, bağlayıcı ve plastikleştiricinin tamamen çözünmesi, uygun viskoziteye ulaşarak döküm esnasında kolay dökülebilir ve kolay sıyrılabilir bir sıvı tabakası oluşturulması, kuruduktan sonra yüzeyden kolayca sıyrılabilen ve pürüzsüz bir ince katman elde edilmesidir. Bu parametrelerin en uygun koşullarda sağlandığı karışım oranı, yapılan bütün deneyler

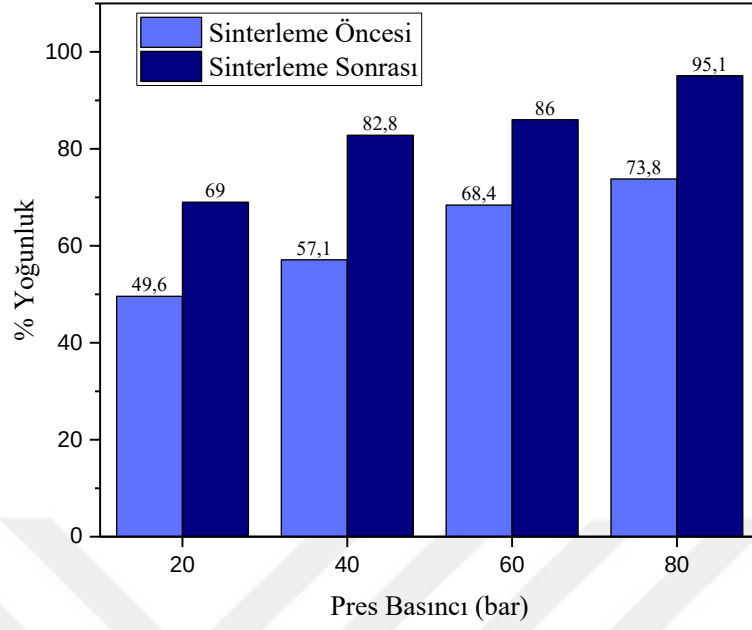
sonucu ortaya konmuştur. Buna göre; %60 Ti64, %10 etanol, %10 ksilen, %3 PVB, %1 PEG ve %16 MEK kullanılan bileşim en uygun özellikleri sağlamıştır. Dağıtıcı olarak kullanılması optimize edilen balık yağının ise çamur içerisinde etkin bir bileşen olmadığı deneylerle saptanmıştır.

5.3. Şerit Döküm Altlık Tabaka Optimizasyon Sonuçlarının İncelenmesi

Şerit döküm işleminde altlık yüzey olarak kullanılması amacıyla farklı malzemeler üzerinde denemeler gerçekleştirilmiştir. Cam yüzey, silikon kaplı cam Yüzey, WD40 kaplı cam yüzey, silikonize kağıt ve Mylar film malzemeler uygulamada kullanılmıştır. Bu altlık yüzeylerden beklenen özellikler şunlardır; malzemenin kolayca yüzeye yayılması ve pürüzsüz olarak kuruması, kuruma sonrasında yüzeyden kolayca sıyrılabilir olması, malzeme ile kimyasal veya fiziksel tepkimeye girmemesidir. Bütün bu özellikleri sağlayan en kullanışlı malzeme Mylar film olarak deneylerle ortaya koyulmuştur.

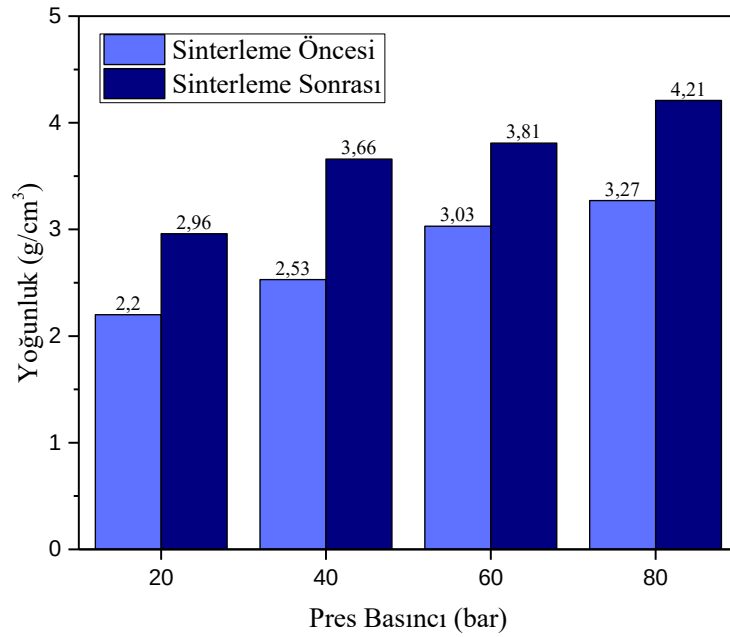
5.4. Yoğunluk Ölçüm Sonuçlarının Analizi

Preslenen numuneler ham yoğunluklarının hesaplanması için sinterleme işleminin öncesinde ağırlık ve büyüklük ölçümüne tabi tutulmuştur. Ti64'ün teorik yoğunluğuna göre ($4,43 \text{ g/cm}^3$), bütün numunelerin yüzde ham yoğunluk hesapları yapılmıştır. Sinterleme işlemi sonrası numunelerin yine büyüklük ve ağırlık ölçümü yapılarak Ti64'ün teorik yoğunluk değerine karşılık deneysel yoğunluk hesaplamaları gerçekleştirilmiştir. Presleme basıncına göre yüzde ham yoğunluk değerlerinin ve sinterleme sonrası yoğunluk değerlerinin değişimi Şekil 5.1'deki grafikte gösterilmiştir. Buna göre, pres basıncındaki artış malzemenin yoğunluğunda artışa neden olmuştur. Aynı zamanda sinterleme işleminin malzeme yoğunluğunu artırdığı görülmektedir. 20 bar altında preslenen numunenin sinterleme öncesi yoğunluğu %49,6 iken, sinterleme sonrası %69 olarak ölçülmüş, 80 bar altında preslenen numunenin ise sinterleme öncesi yoğunluğu %73,8 iken sinterleme sonrası %95,1'e yükselmiştir. Optimum basınç değeri olarak 80 bar seçilmiş ve sonraki süreçlerde bu basınç altında presleme çalışmaları sürdürülmüştür.



Şekil 5.1. Pres basıncına karşılık sinterleme öncesi ve sonrası numunelerin yüzde yoğunluk değişimi

Şekil 5.2'deki grafikte ise presleme basıncına karşılık sinterleme öncesi ve sinterleme sonrası numunelerin yoğunluk değerleri verilmiştir.



Şekil 5.2. Pres basıncına karşılık sinterleme öncesi ve sonrası numunelerin yoğunluk değişimi

Sinterleme sonrası yapılan yoğunluk hesaplamalarına göre pres basıncındaki artışla birlikte yoğunluğun arttığı görülmüştür. Bununla birlikte sinterleme işleminden geçirilen numunelerin yüzde ham yoğunlukları da göz önüne alındığında ısıtma işlemi sonrası organiklerin uzaklaştırılması ve Ti64 malzemenin atomsal düzeyde çekim kuvvetlerinin artmasıyla birlikte yoğunluğu artış göstermiştir. Yoğunluk artışına neden olan mikroyapı incelemesi SEM analizi bölümünde detaylandırılmıştır.

5.5. Grafen Sprey Kaplama Optimizasyon Sonuçlarının Analizi

Ti64 kompozit katmanların yüzeylerine spreyle kaplama yöntemiyle grafen takviyesi yapılmıştır. Katmanlama işlemi sonrası ısıtma işlemlerinden geçirilen malzemelerin özellikleri incelenerek, grafen takviyesinin Ti64'ün fiziksel ve mekanik özellikleri üzerindeki etkileri ortaya konulmuştur.

Tablo 5.1'de spreyle süresine bağlı olarak kaplama ağırlığındaki değişim gösterilmiştir.

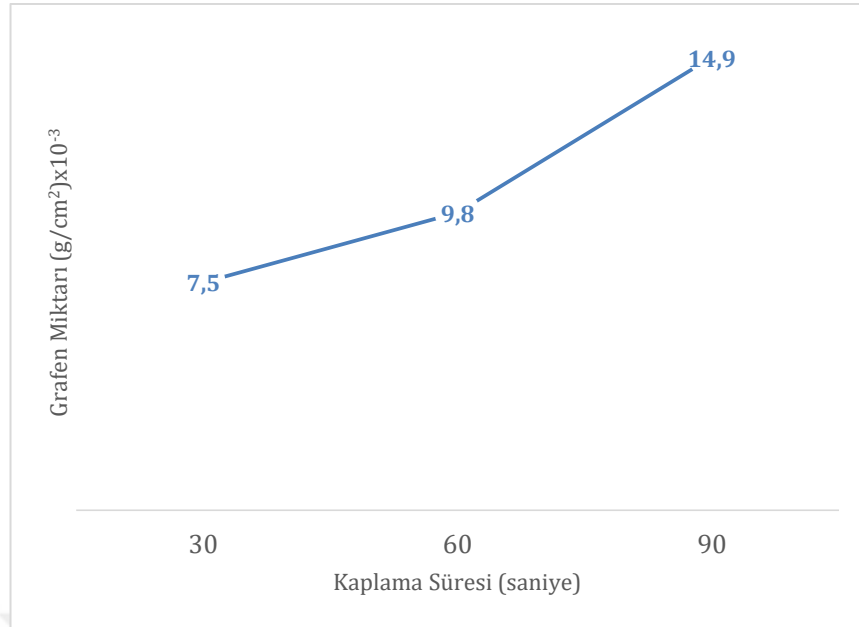
Tablo 5.1. Spreyle süresine bağlı olarak grafen miktarındaki değişim

Kaplama Süresi (s)	İlk Ağırlık (g)	Son Ağırlık (g)	Grafen Miktarı (g)	Grafen Miktarı (ağ.%)
30	4,07	4,30	0,23	5,35
60	4,08	4,38	0,30	6,85
90	4,05	4,51	0,46	10,2

Tablodaki ağırlıklar 24'lü numune setlerinden oluşmuş Ti64 kompozitlerin ilk ağırlıkları ve 30, 60 ve 90 saniye süre ile ayrı ayrı kaplama yapılmış son ağırlıklarına ait değerlerdir.

Şekil 5.3'te kaplama süresine bağlı olarak değişen grafen miktarının cm^2 'ye düşen ağırlık değeri verilmiştir. Buna göre artan süre doğrultusunda kaplamanın ağırlık değeri, yani diğer bir deyişle kaplama kalınlığı artmıştır.

Grafenin katmanlar arasındaki kaplama takviyesinin miktarı incelenmek üzere numunelerin sertlik, aşınma dayanımı, termal iletkenlik ve mikroyapı özelliklerine bakılmıştır. Bunlarla ilgili sonuçlar aşağıda özetlenmiş ve her bir analizin sonuçları başlıklarının altında detaylandırılmıştır.



Şekil 5.3. Kaplama süresine karşılık değişen grafen miktarı

Ara yüzeyde uygulanan grafenin varlığı, kompozit malzemenin sertliğini belirli bir değere kadar artırmıştır. %0,30 ve ara yüzeyinde grafen takviyesi içeren 30-G kodlu numune sertlik değerini yükseltirken, %0,45 oranında grafen takviyesi içeren kompozitlere ara yüzey grafen uygulaması, yani 45-G kodlu numune sertlik değerini 45-0 kodlu numuneye göre düşürmüştür. Grafenin kompozit içerisindeki varlığı belirli bir değeri aştığı noktada, malzeme özelliklerinin sebep olduğu topaklanma eğilimi ve katı yağlayıcı özelliğin negatif etki yaratması sebebiyle mekanik özelliklerin olumsuz etkilenmesi görülmektedir. Aşınma dayanımına bakılacak olursa, grafenin ara yüzeydeki varlığı 30-G numunesinden yukarılara gidildikçe aşınmaya karşı gösterilen direnci düşürmektedir. Burada meydana gelen olumsuz sonuçlarda, grafenin topaklanması sonucu oluşan homojen olmayan bölgeler devreye girmektedir. Bu bölgeler malzeme içerisindeki poroziteyi de artırarak deformasyona karşı daha düşük direnç göstermekte, yani aşınma dayanımı düşmektedir. Termal iletkenlik özelliklerine bakılırsa, kompozit katmanların ara yüzeylerinde grafenin kaplama yöntemiyle takviye edilmesi sonrası termal iletkenlik davranışının her numune için arttığı görülmüştür. Yani 0-0 kodlu numuneye göre 0-G'nin, 15-0 kodlu numuneye göre 15-G'nin, 30-0 kodlu numuneye göre 30-G'nin ve 45-0 kodlu numuneye göre ise 45-G'nin termal iletkenliği göreceli olarak artmıştır. Ancak 30-G'den sonraki durumda, yani grafen takviyesi %0,30'un üzerine çıktığı andan itibaren katman yüzeylerine grafen kaplaması olması durumunda termal iletkenlik davranışında nispeten azalış görülmektedir. Bunun sebebinin katmanlar arasındaki ayrılmanın

olması muhtemeldir. Malzeme içindeki ısı iletiminin buradaki katmanlarda meydana gelen ayrışma dolayısıyla daha yavaş gerçekleşmesi durumu söz konusudur.

5.6. Grafen Takviye Oranının Optimizasyon Sonuçlarının Analizi

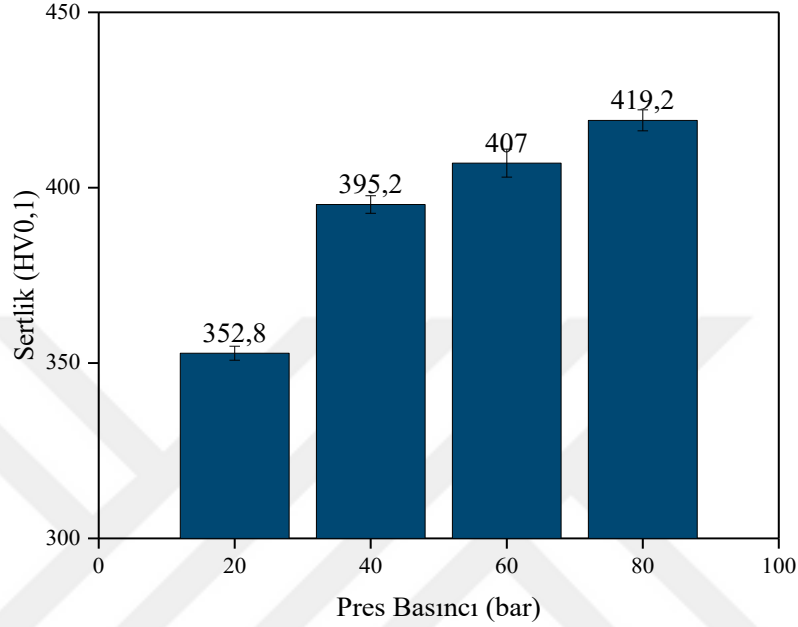
Grafen katkısının oranları Ti64'e göre ağırlıkça %0, %0,15, %0,30 ve %0,45 olarak belirlenmiştir. Takviye edilen grafen miktarının kompozit malzemenin özelliklerine etkisi mekanik testler ve mikroyapı analizleri ile incelenerek en uygun takviye oranı belirlenmiştir. Buna göre elde edilen sonuçlar tüm analizlerin başlıkları altında detaylandırılmakla birlikte burada özetlenmiştir. Sertlik değerlerinin sonucunda 676,87 HV0,1 ile %0,45 grafen takviyesi en sert malzeme davranışı sergilemiştir. Aşınma davranışına bakıldığında, en düşük aşınma oranının ara yüzeyde grafen yok iken $1,015 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ olarak hesaplandığı kompozit malzemenin %0,30 grafen takviyesi içeren numune olduğu görülmektedir. Ara yüzeyde grafen varlığında ise yine %0,30 grafen takviyesi içeren numunede $0,933 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ değeri ile en düşük aşınma oranı görülmektedir. Termal iletkenlik davranışına göre ise, %0,30 grafen takviyesi içeren numunenin ara yüzeyde de grafen takviyesi içerdiği kompozisyon en yüksek termal iletkenlik özelliği sergilemiştir.

5.7. Sertlik Ölçüm Sonuçlarının Analizi

Sertlik ölçümü için ilk aşama olarak grafen takviyesi öncesi numunelere pres basıncının etkisini görmek amacıyla test uygulanmıştır.

Şekil 5.4'teki grafikte, presleme basıncındaki değişime bağlı olarak değişen sertlik değerleri verilmektedir. Buna göre, basıncın artmasıyla birlikte numunenin birim yüzeyine etki eden kuvvet de artmıştır. Katmanların daha fazla yük altında sıkıştırılması ve birbirleriyle fiziksel olarak daha güçlü şekilde birleşmesi sağlanmıştır. Taneler arası boşlukların düşük yük uygulanan kompozitte daha fazla, yüksek yük uygulanan kompozitte ise daha az olması sebebiyle batıcı ucun yol açtığı deformasyon miktarı azalmış ve dolayısıyla ölçülen sertlik değeri daha yüksek çıkmıştır. 20, 40, 60 ve 80 bar olarak farklı değerlerde basınç uygulanan kompozitlerin sertlik değerleri sırasıyla; 352,8, 395,2, 407,0 ve 419,2 HV0,1 olarak ölçülmüştür. Daha yüksek değerlerde basınç altında sıkıştırma durumunda ise bazı olumsuz sonuçlarla karşılaşmıştır. Kalıp içerisindeki malzemenin kenarlara sıvanması ve kalıbın sıkışması durumu söz konusu olmuştur. Diğer yandan aşırı yük uygulanması

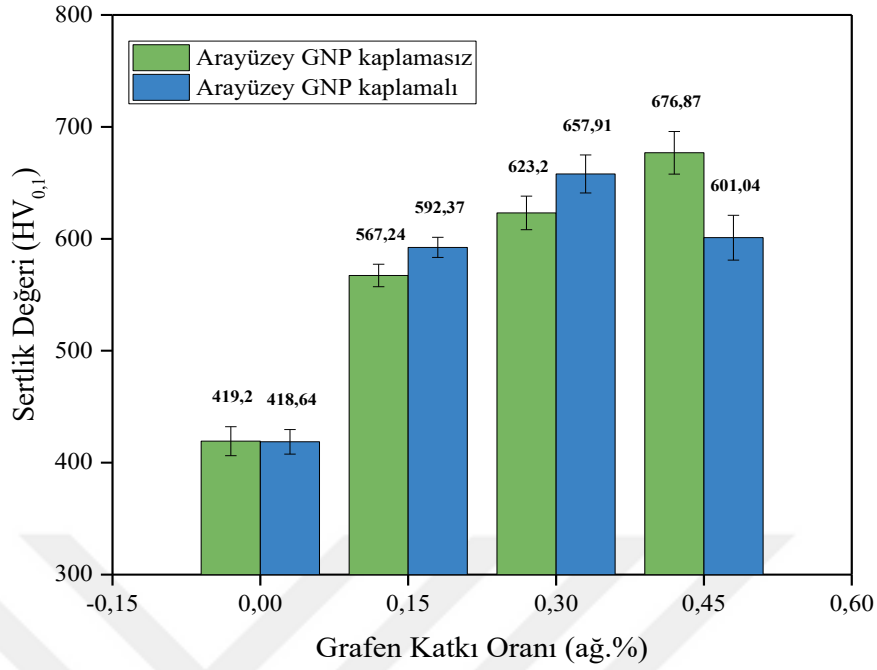
sonucunda malzemenin mikroyapısında istenmeyen tane yönlenmesine yol açılması muhtemeldir. Tanelerin orjinal yapısının değişerek incelmış ve yönlenmiş tane yapısı oluşumu meydana gelebileceği için optimum basınç altında sıkıştırma işlemi tercih edilmiştir. Bu değer ise 80 bar olarak kabul edilmiştir.



Şekil 5.4. Pres basıncına karşılık sertlik değerinin değişimi

İkinci süreçte, Ti64 içerisine takviye edilen grafenin, kompozit yapının sertlik değerine nasıl etki ettiği analizi edilmek üzere mikro Vickers ölçümü uygulanmıştır. Kompozit üretim sürecinde grafen takviyesi iki farklı biçimde uygulanmıştır. Bunlardan ilki saf Ti64 ve Ti64 kompozit şeritler üzerine elektrosprey ile grafen kaplanması, ikincisi ise toz karıştırma aşamasında Ti64 ve grafenin ağırlıkça farklı oranlarda ilavesi ile şerit döküm çamuru hazırlanırken grafenin takviyesidir. Numunelerin kodlarına karşılık takviye oranları ele alınarak her bir numuneye sertlik ölçümü uygulanmış ve bu sekiz farklı kompozisyon sertlik değeri bakımından karşılaştırılmıştır.

Şekil 5.4'teki grafikte verilenlere göre, arayüzeyde grafen olan katmanlar mavi sütun ile, arayüzeyde grafen olmayan katmanlar yeşil sütun ile gösterilmiştir. Bu değerler doğrultusunda grafen katkısının hem arayüzeyde hem de döküm sıvısı içerisindeki varlığı sertlik değerini yükseltmiştir.



Şekil 5.5. Grafen katkı oranına bağlı olarak değişen sertlik değeri

Döküm sıvısı içerisinde belli oranlarda takviye olarak kullanılan grafen ile üretilen Ti64 katmanlı kompozitlerin %0,15 ve %0,30 grafen oranlarına karşılık gelen örneklerine arayüzeyde de grafen kaplama uygulanması sertlik değerlerini yaklaşık olarak %6 daha artırmıştır. Ancak %0,45 oranında döküm sıvısının içerisinde yapılan grafen katkısı ile üretilen Ti64 katmanlı kompozitlerde arayüzeyde grafen kaplaması uygulandığında sertlik değerini olumsuz yönde etkilemiştir. Grafen kaplamasız numunede sertlik 676,87 HV_{0,1} ölçülürken, grafen kaplamalı numunede 601,04 HV_{0,1} olarak ölçülmüştür.

5.8. Aşınma Test Sonuçlarının Analizi

Farklı oranlarda grafen katkısı içeren Ti64 kompozitlerin aşınmaya karşı gösterdikleri direnç analiz edilmek üzere aşınma testi uygulanmıştır. 5.2’de numune kodlarına karşılık, standart parametrelerde yapılan aşınma testleri sonucunda meydana gelen aşınma oranları verilmiştir.

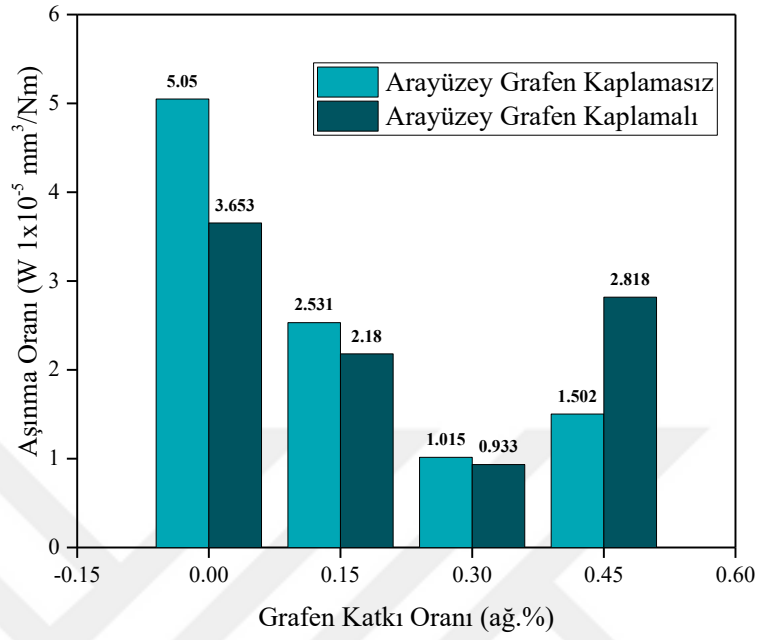
Tablo 5.2. Aşınma testleri sonucu hesaplanan aşınma oranı değerleri

Numune Kodu	İlk Kütle (M ₁) [g]	Hacim (V) [mm ³]	Yoğunluk ($\rho=M_1/V$) [g/cm ³]	Son Kütle (M ₂) [mg]	Aşınan Hacim ($\Delta V=(M_1-M_2)/\rho$) [mm ³]	Aşınma Oranı ($W= \Delta V/(PL)$) [1x10 ⁻⁵ mm ³ /(Nm)]
0-0	0,770	194,4	3,9	0,760	2,5244	5,049
0-G	0,959	219,0	4,3	0,951	1,8264	3,653
15-0	1,039	263,0	3,9	1,034	1,2656	2,531
15-G	1,182	257,6	4,6	1,177	1,0898	2,180
30-0	0,959	243,3	3,9	0,957	0,5074	1,015
30-G	0,763	177,9	4,2	0,761	0,4663	0,932
45-0	0,986	246,8	4,0	0,983	0,7509	1,502
45-G	0,685	160,8	4,2	0,679	1,4089	2,818

Şekil 5.6’da verilen grafen oranı-aşınma oranı grafiğine göre; Ti64 içerisinde ağırlıkça %0,30 oranında grafen takviyesi bulunan kompozitte en az aşınma meydana gelmiştir. Sonrasında ise %0,45 oranına kadar artan grafen takviyesindeki durumda aşınma miktarı artmıştır. En düşük aşınma miktarı gösteren %0,30 grafen içeren kompozit için ise ara yüzey grafen durumuna bakılırsa, ara yüzeyinde grafen olan kompozit numune 0,932 mm³/(Nm) ile en düşük aşınma oranını vermiştir. Ara katmanlarda grafen olmayan numunede ise sonuç 1,015 mm³/(Nm) aşınma oranı ile ikinci en iyi değerdir. Yani hem ara yüzey hem de döküm sıvısı içerisinde (%0,30) grafen bulunması, kompozitin aşınma dayanımını iyi bir seviyeye kadar yükselmiştir.

Ancak içerikteki grafen takviyesi oranı ağırlıkça %0,45 oranına geldiğinde ve bu numunelere arayüzeyde grafen takviyesi gerçekleştirildiğinde ise aşınma dayanımında büyük oranda bir düşüş meydana geldiği görülmektedir. Bu sonuçlar gösteriyor ki; grafenin yüksek aşınma dayanımı özelliği sayesinde Ti64 kompozitlerin de sürtünmeye karşı gösterdiği aşınma dayanımı artmıştır. Grafenin matris içinde belli bir orandan fazla takviye elemanı olarak bulunması ise malzeme özelliklerini olumsuz yönde etkilemektedir. Grafen miktarındaki artış topaklanma eğilimini de artırmakta, dolayısıyla iç yapıda homojen olmayan bir dağılım meydana gelmektedir. Bu da mekanik dayanımı olumsuz yönde etkilenmektedir. Ayrıca grafen katı yağlayıcı özelliğinden dolayı, malzeme içerisinde yüksek oranda bulunması durumunda kayma gerilimini düşürerek deformasyona sebep olacak kuvveti de düşürmektedir. Bu

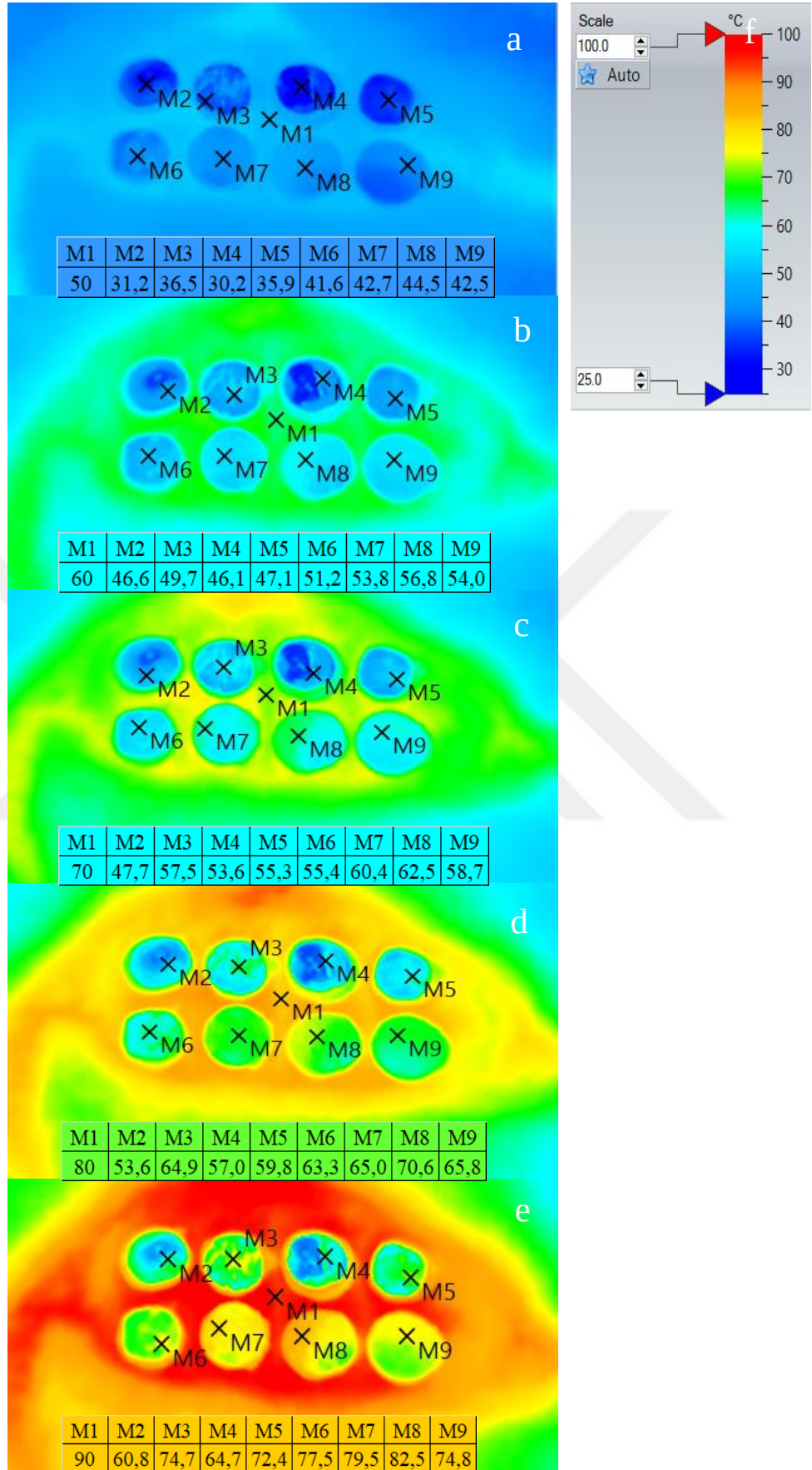
durumda daha az mekanik zorlanmalar altında daha yüksek deformasyonlar oluşabilmektedir.



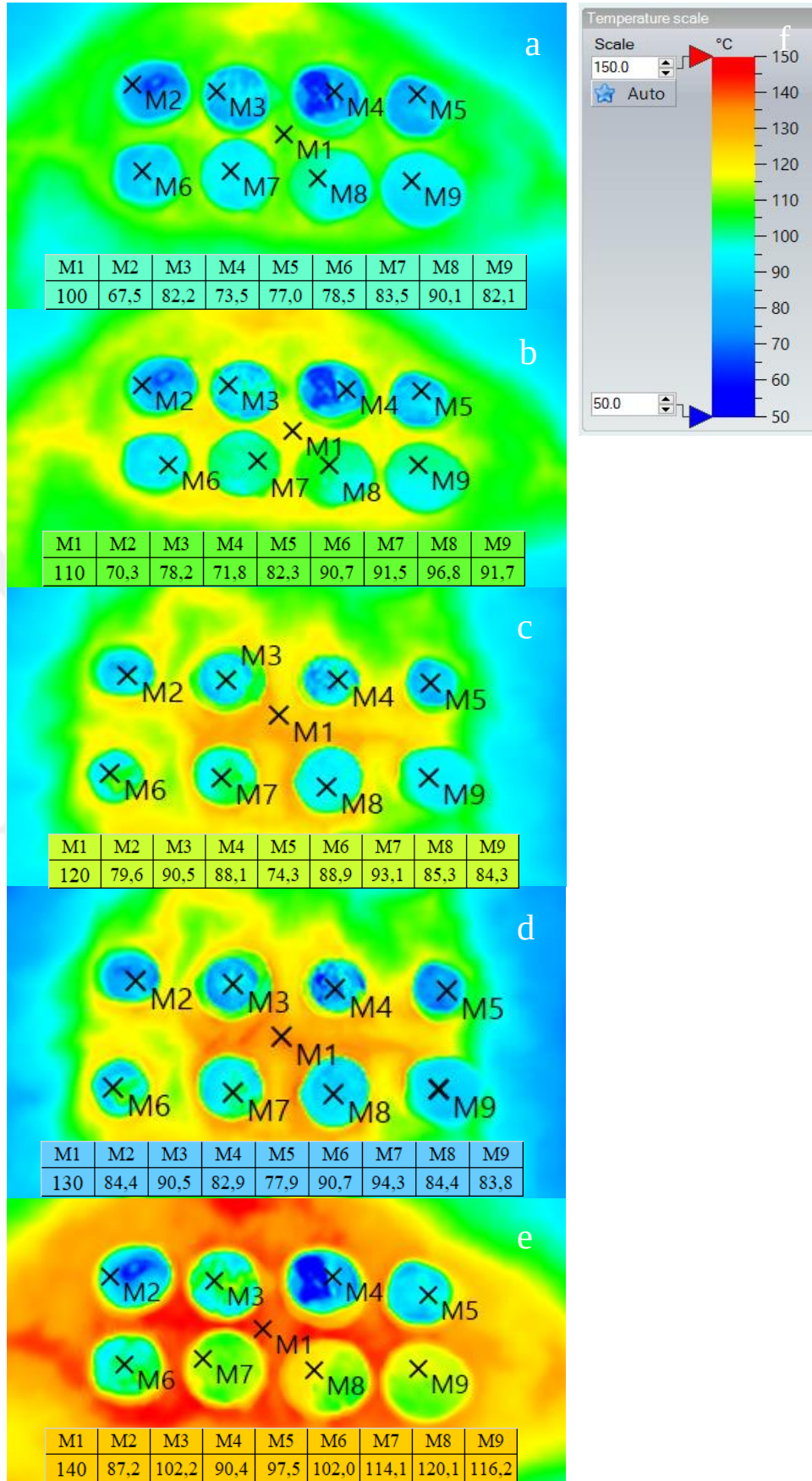
Şekil 5.6. Grafen takviyesine karşılık aşınma oranı grafiği

5.9. Termal İletkenlik Test Sonuçlarının Analizi

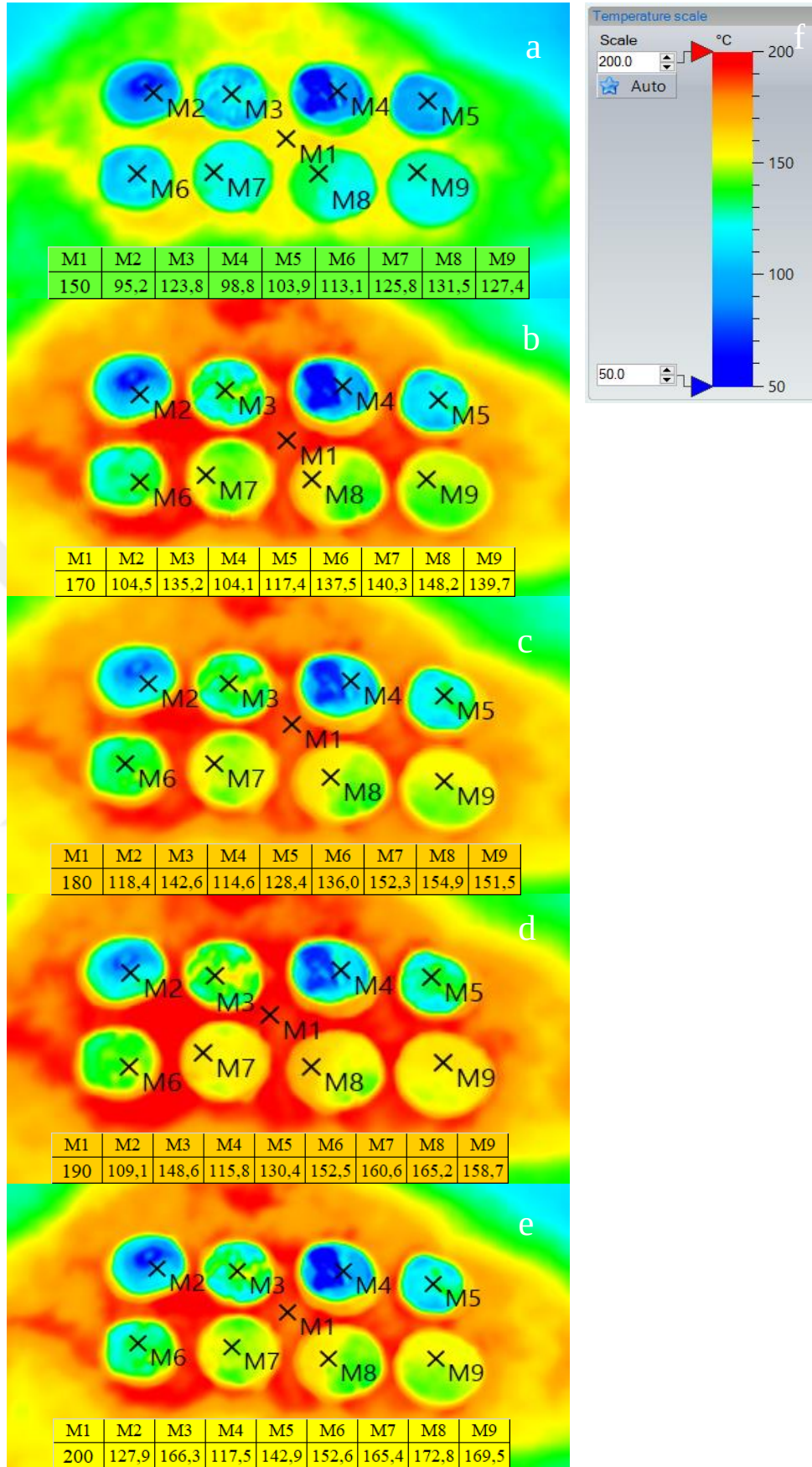
Grafen takviyesinin oranının ve takviye biçiminin Ti64 matrisli kompozitler üzerindeki etkilerinden biri olan termal iletkenlik davranışındaki değişim, iletkenlik testi uygulanarak analiz edilmiştir. Bunun için, ısıtıcı tabla yüzeyinden ısı verilen numunelerin görüntüleri termal kamera yardımıyla kaydedilerek işlenmiş ve en hızlı ısı iletimini sağlayan kompozit malzeme belirlenmiştir. Buna göre işlenen görüntüler sırasıyla Şekil 5.7, Şekil 5.8 ve Şekil 5.9’de verilmiştir.



Şekil 5.7. Farklı sıcaklıklarda yapılan termal ölçümler: (a) 50°C, (b) 60°C, (c) 70°C, (d) 80°C, (e) 90°C ve (f) sıcaklık skalası



Şekil 5.8. Farklı sıcaklıklarda yapılan termal ölçümler: (a) 100°C, (b) 110°C, (c) 120°C, (d) 130°C, (e) 140°C ve (f) sıcaklık skalası



Şekil 5.9. Farklı sıcaklıklarda yapılan termal ölçümler: (a) 150°C, (b) 170°C, (c) 180°C, (d) 190°C, (e) 200°C ve (f) sıcaklık skalası

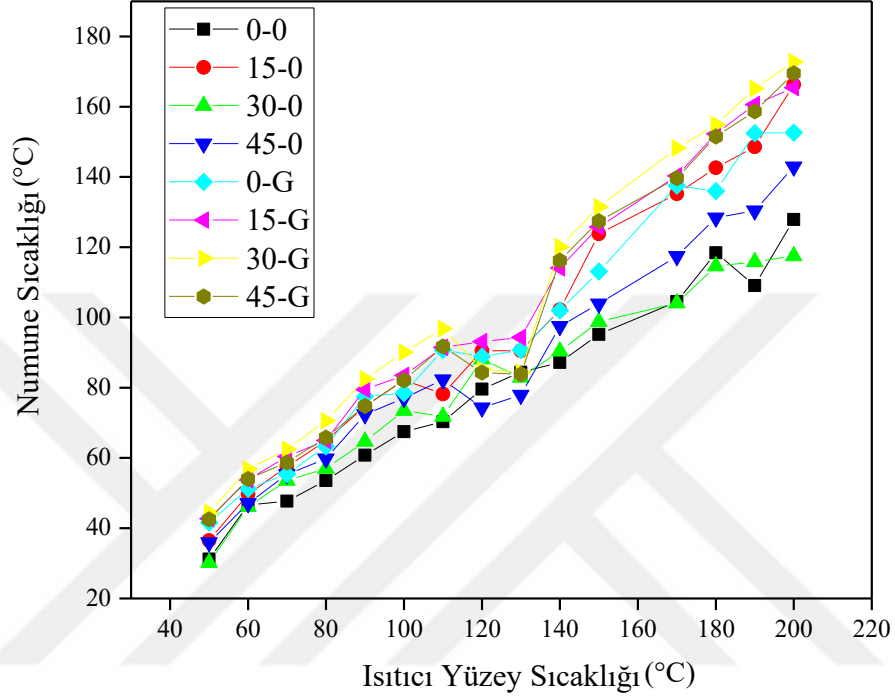
Şekillerde görüleceği üzere, ısıtıcı yüzeyin orta noktasından alınan sıcaklık değeri için işaret kodu M1’dir. Diğer numuneler için ise sırasıyla Tablo 5.3’teki gibi işaret kodu verilmiştir.

Tablo 5.3. Numune koduna karşılık işaret kodu ve ölçülen sıcaklık değerleri

Numune Kodu	Isıtıcı	0-0	15-0	30-0	45-0	0-G	15-G	30-G	45-G
İşaret Kodu	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9
Malzeme Sıcaklığı (°C)	50	31,2	36,5	30,2	35,9	41,6	42,7	44,5	42,5
	60	46,6	49,7	46,1	47,1	51,2	53,8	56,8	54,0
	70	47,7	57,5	53,6	55,3	55,4	60,4	62,5	58,7
	80	53,6	64,9	57,0	59,8	63,3	65,0	70,6	65,8
	90	60,8	74,7	64,7	72,4	77,5	79,5	82,5	74,8
	100	67,5	82,2	73,5	77,0	78,5	83,5	90,1	82,1
	110	70,3	78,2	71,8	82,3	90,7	91,5	96,8	91,7
	120	79,6	90,5	88,1	74,3	88,9	93,1	85,3	84,3
	130	84,4	90,5	82,9	77,9	90,7	94,3	84,4	83,8
	140	87,2	102,2	90,4	97,5	102,0	114,1	120,1	116,2
	150	95,2	123,8	98,8	103,9	113,1	125,8	131,5	127,4
	170	104,5	135,2	104,1	117,4	137,5	140,3	148,2	139,7
	180	118,4	142,6	114,6	128,4	136,0	152,3	154,9	151,5
	190	109,1	148,6	115,8	130,4	152,5	160,6	165,2	158,7
	200	127,9	166,3	117,5	142,9	152,6	165,4	172,8	169,5

Şekil 5.10’da ısıtıcı yüzey sıcaklığına karşılık kompozit malzemelerin yüzeylerinden alınan sıcaklık değerleriyle oluşturulmuş grafik verilmektedir. Buna göre ısıtıcı tablanın sıcaklığı 50°C değeri ile başlayarak 200°C’ye kadar artış gösterirken, ölçüm yapılan her bir değer için 10 saniye bekleme süresi sonunda yüzeylerden alınan sıcaklıklara göre en yüksek değerler M8 kodlu yüzeyde, yani 30-G ile adlandırılan %0,30 oranında grafen takviyeli ve ara yüzeyde grafen takviyesi içeren numune yüzeyinde görülmektedir. Burada ölçüm yapılan onbeş farklı sıcaklık

değerinden yalnızca iki tanesi (120°C ve 130°C) için M7 yüzeyinde M8 yüzeyinden daha yüksek değer ölçülmüştür. İstatistiksel olarak hata sınırları içerisinde kabul edeceğimiz bu sonuçlar genel sonuç hakkındaki kanıyı etkilememektedir. Dolayısıyla en yüksek termal iletkenlik davranışı sergileyen numunenin 30-G olduğu söylenebilir.



Şekil 5.10. Isıtıcı yüzey sıcaklığı – numune sıcaklığı grafiği

Numunelerin geometrik özelliklerinin (kalınlık ve kesit alanı) aynı olduğu ve ortam şartlarının da aynı olduğu düşünülürse ölçümlerde farklı değerlerin elde edilmesi kompozitlerin ısı iletkenliğiyle açıklanabilir. İletkenlik davranışı burada takviye malzemenin gösterdiği etkiyle birlikte şekillenmiştir. Termal iletkenliği 4840-5300 W/mK aralığında bir değere sahip olan grafenin, termal iletkenliği 6,7 W/mK olan Ti64 metal matrisinin içerisine takviye edilmesi sonucu elde edilen Ti64 kompozitlerin termal iletkenliğinde takviyesiz Ti64'e göre artış görülmüştür. Burada M2 koduyla yer alan 0-0 isimli numune, grafen takviyesi içermeyip Ti64'ün şerit döküm yöntemiyle üretilmiş şeklidir. M2 numunesiyle kıyaslama yapılacak olursa, grafen içeren numunelerde artan grafen oranına göre ölçülen sıcaklık artmaktadır.

Diğer taraftan grafen takviyesindeki artışın belli bir değerden sonra malzemenin termal iletkenliğini düşürdüğü görülmektedir. Mikroyapı analizinde görülmüştür ki,

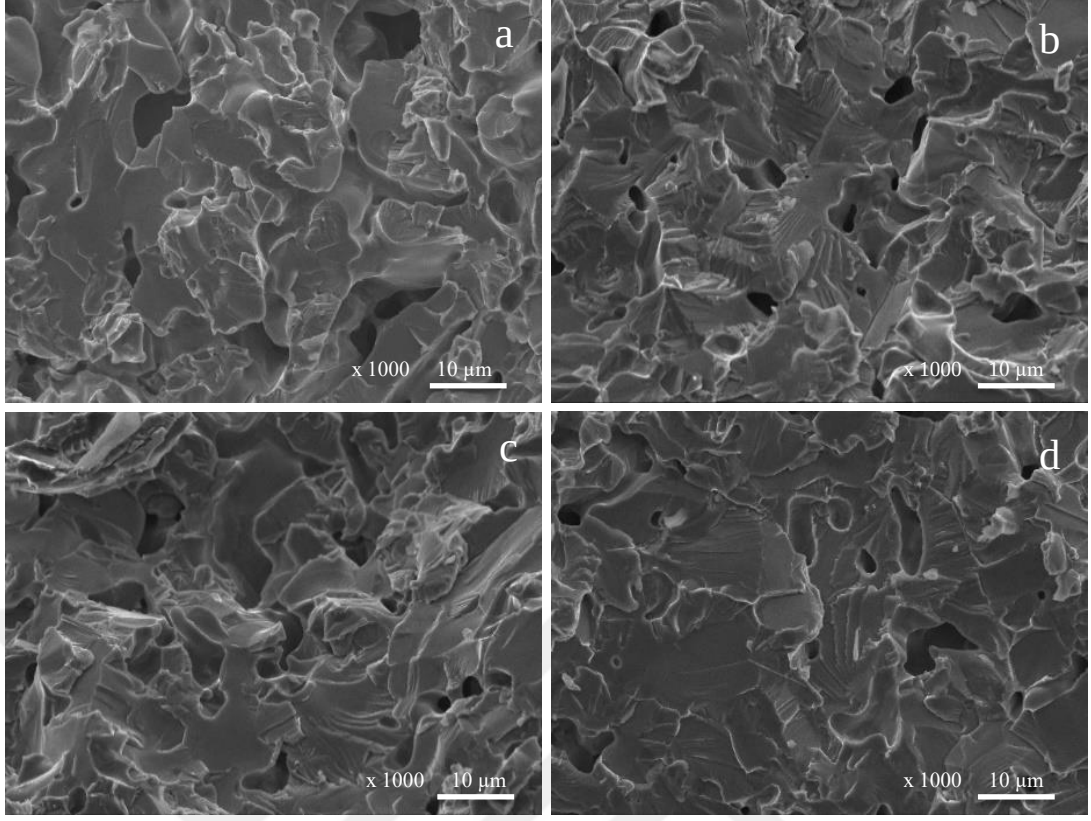
grafen takviyesi arttıkça termal genleşme farklılığı ve kayma geriliminin azalması gibi etkiler sonucu katmanlı kompozit yapıdaki katmanlar arası ayrışma artmıştır. Bu ayrışmanın sonucu olarak termal iletkenlik düşmektedir. Çünkü yapı içerisinde oluşan boşluklar dolayısıyla ısı transfer hızı yavaşlamaktadır. Taneler arası boşlukların artması, malzeme yoğunluğundaki azalışlar ısı transferini ters orantılı olarak değiştirmektedir. Bu nedenle Şekil 5.18'ta da görüleceği üzere, %0,45 oranında grafen içeren numunede meydana gelen ayrışma fazladır.

5.10. Mikroyapı Görüntülerinin Analizi

KİTAM bünyesinde bulunan SEM cihazında numunelerin kırık yüzey görüntüsü incelenmiştir. SEM incelemeleri ile, presleme basıncının mikroyapıya olan etkisi, kaplama süresinin mikroyapıya olan etkisi, grafen katkısının mikroyapıya olan etkisi analiz edilmiştir.

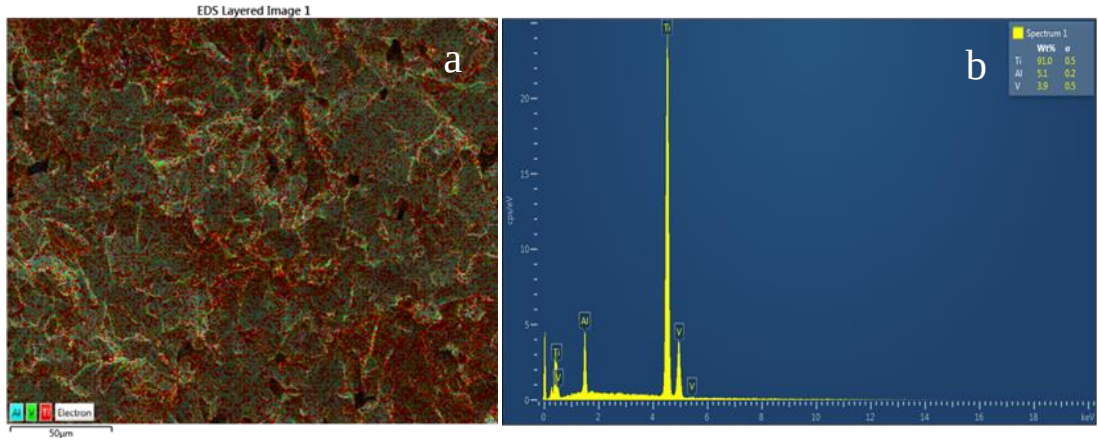
5.10.1. Farklı Basınlarda Sıkıştırmanın Malzeme Mikroyapısına Etkisi

Yapılan SEM görüntüleme işlemine göre, farklı basınçlarda preslenmiş ve 1300°C'de 120 dakika sinterlenmiş numunelerin içyapıları analiz edilmiştir. KİTAM Görüntüleme ve Karakterizasyon Laboratuvarında gerçekleştirilen SEM ve EDS analizlerinde, grafen takviyeli çok katmanlı Ti64 kompozitlerin mikroyapısı detaylı olarak incelenmiştir. Şekil 5.11'teki SEM analizlerine göre, 20, 40, 60 ve 80 bar altında preslenen numuneler için basıncın artmasıyla yoğunlukta artış görülmektedir. Malzemelerdeki gözeneklilik miktarı basınç artışı ile birlikte azalmıştır. Taneler arası boyun oluşumunun çok iyi olduğu söylenebilir. Tanecik yapıları incelenecek olursa, az yoğun malzemede daha küresel bir formda bulunan Ti64 taneleri, yoğunluk artışıyla birlikte daha çok köşeli bir geometri kazanmaya başlamıştır. Taneler arası boşluklar mekanik dayanım açısından istenmeyen bir durumdur. Dislokasyonların ilerlemesi sırasında taneler arasında bulunan boşluklar çatlak oluşumunu ve ilerlemesini kolaylaştıracak, böylece daha kolay hasara uğrayan bir malzeme elde edilecektir. Bu nedenle yoğun ve ince taneli yapıya sahip olan 80 bar altında preslenmiş numune en iyi mikroyapı örneği sergilemektedir.



Şekil 5.11. Farklı basınçlarda preslenen Ti64 kompozitlerin kırık yüzey görüntüleri: (a) 20 bar, (b) 40 bar, (c) 60 bar ve (d) 80 bar basınç altında preslenen numuneler

Şerit döküm yöntemiyle üretilen Ti64 malzemeden katmanlı olarak preslenmiş numuneye EDS analizi yapılarak elementel olarak ayrıntılar gösterilmiştir (Şekil 5.12). Buna göre Ti, Al ve V içeriğinin oranları analiz edilmiş ve kayda değer bir kirlilik veya istenmeyen bir yapıya rastlanmamıştır. Ti64 alaşımının ihtiva ettiği teorik oranlar; %90 titanyum, %6 alüminyum ve %4 vanadyumdur. Analiz sonuçlarına göre ise; %91 titanyum, %5,1 alüminyum ve %3,9 vanadyum içerdiği saptanmıştır. Buna göre teorik değerlerin analiz sonuçlarıyla çok yakın durumda olduğu söylenebilir.



Şekil 5.12. Ti64 katmanlı kompozite ait görüntüler: (a) EDS görüntüsü, (b) elementel haritalama

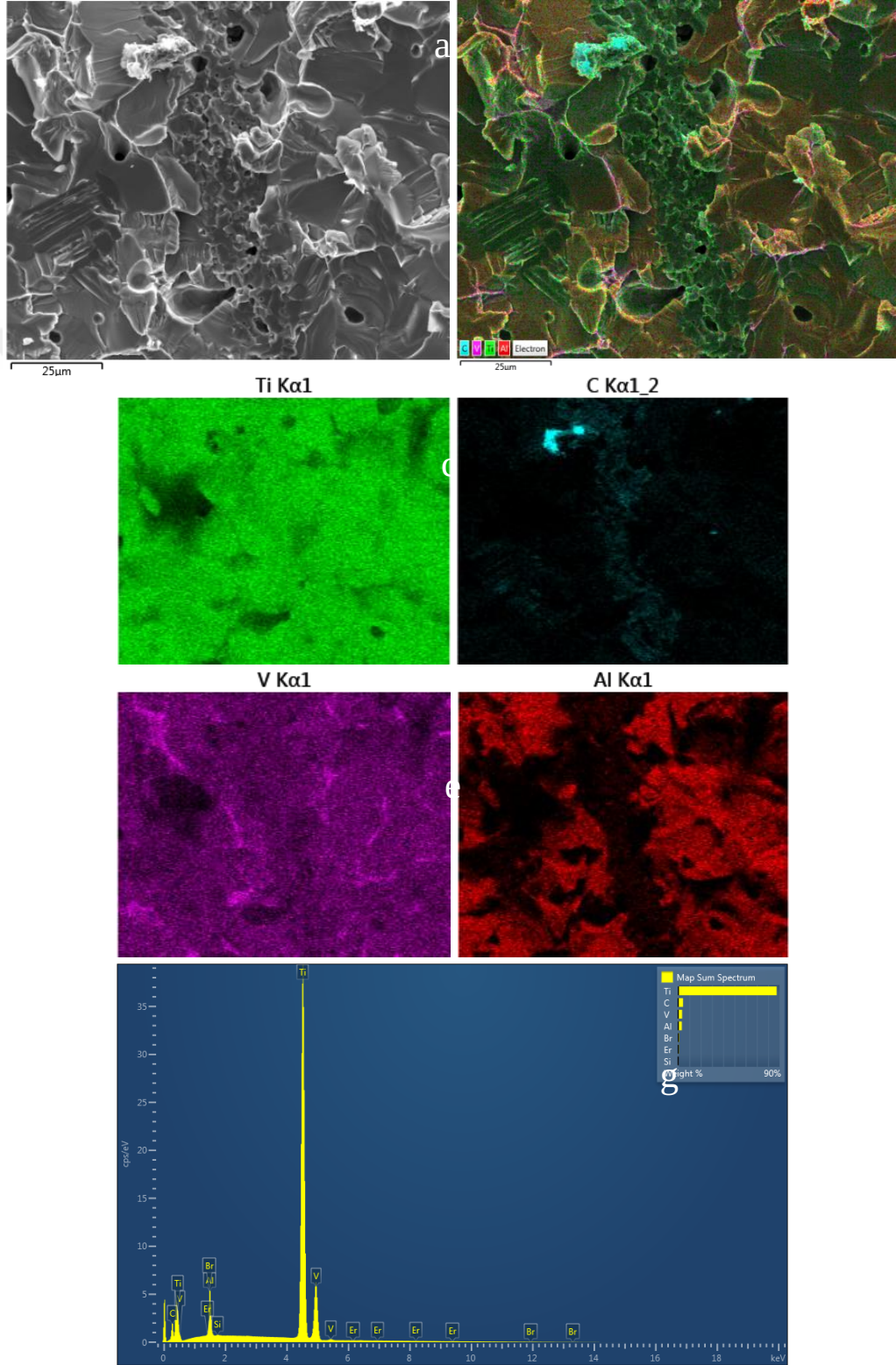
5.10.2. Ara Yüzeyde Grafen Kaplama Miktarının Malzeme Mikroyapısına Etkisi

Kaplama miktarının, dolayısıyla kaplama süresinin malzeme mikroyapısına olan etkisinin incelenmesi için gerçekleştirilen SEM analizine göre, 30 saniye, 60 saniye ve 90 saniye süre ile spreyl kaplama uygulanan yüzeylerin katmanlı kompozit yapıları incelenmiştir. Katmanların ara yüzeylerinde bulunan grafenin varlığı ve Ti64 matris içerisindeki mikroyapı davranışı

Şekil 5.13’da gösterilmiştir. 30 saniye grafen kaplama uygulanmış Ti46 malzemeye ait görüntülerde SEM analizi, EDS analizi ve elementel dağılım yer almaktadır. Görüntülerde matris eleman Ti64 ve takviye eleman grafen bölgeleri açıkça görülmektedir. Ayrıca Ti64 alaşımının bileşenleri de grafik ve haritalama üzerinde görülmektedir.

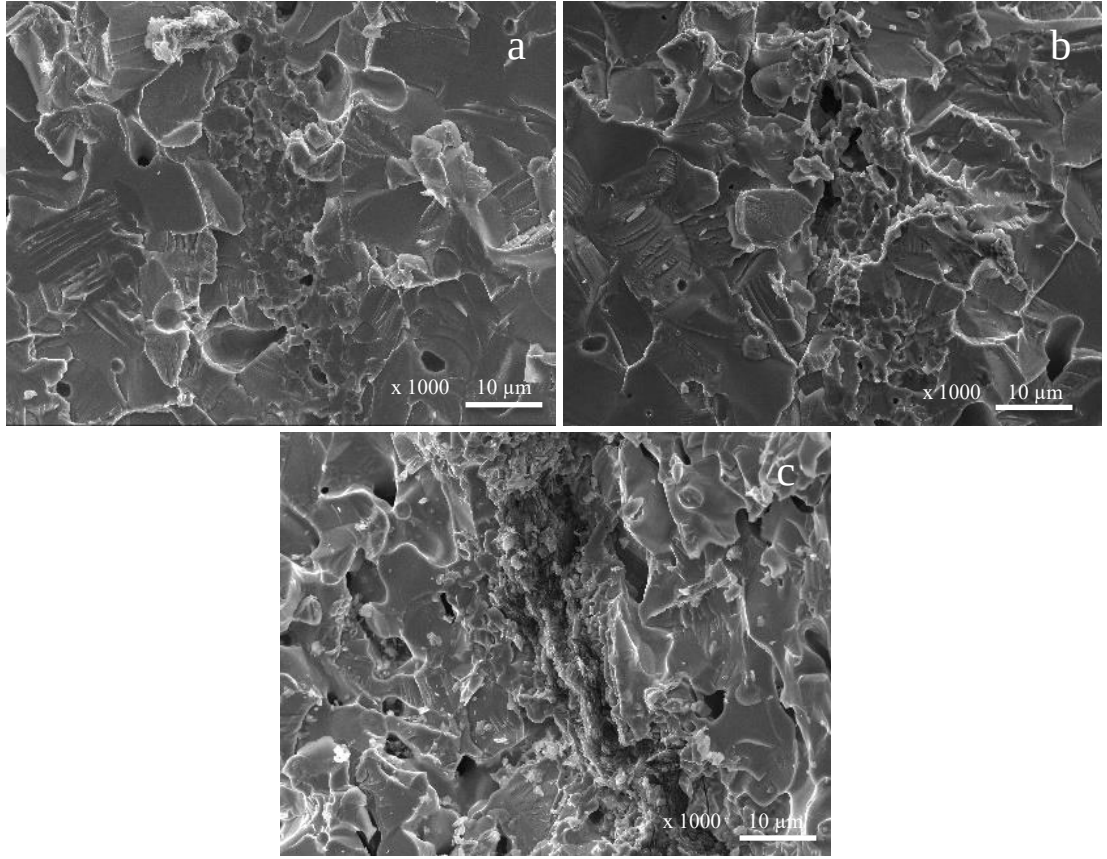
Buna göre, grafen miktarının artması laminasyonun da artmasına sebep olmuştur. Yani katmanlar arasında ayrışmalar grafen ile doğru orantılı olarak artmıştır. Grafen yapısı gereği katı yağlayıcı özelliğe sahiptir. Bu nedenle belli bir noktadan sonra artan grafen miktarına bağlı olarak katı yağlayıcı özelliğinin artması ile katmanlar arası kayma geriliminin azalması ve çatlak oluşumunun meydana gelmesi görülmüştür. Kompozit malzemelerin sinterlenmesi ve ön ısıtma işlemlerden geçirilmesi sırasında maruz kaldığı sıcaklıktan dolayı malzemelerde termal genleşme farklılığı meydana gelmiş, grafen bölgeleri ve Ti64 bölgelerinde laminasyonlar oluşmuştur. Ayrıca grafen miktarındaki artış topaklanma davranışını da arttırmaktadır. Bu da homojen olmayan lokal bölgeler meydana getirmekte ve çatlak oluşumunu

artırmaktadır. Kaplama süresinin 30 saniyeden daha uzun sürelerle çıkması sonrası deformasyon miktarları da artmaktadır. Bu nedenle optimum kaplama süresi 30 s olarak belirlenmiştir. 5.37’de de görüleceği gibi, 90 s kaplama uygulanması sonrası katmanların belirgin seviyede ayrıştığı görülmektedir.



Şekil 5.13. Ti64 kompozit malzemeye ait görüntüler: (a) SEM, (b) SEM-EDS ve (c-g) elementel dağılım

Şekil 5.14’de farklı sürelerde grafen kaplaması yapılmış Ti64 kompozitlere ait SEM görüntüleri yer almaktadır. SEM görüntülerine göre, grafen bölgeleri olarak adlandıracağımız ince sınırlar, kaplama süresi ile doğru orantılı olarak artan grafen miktarından dolayı daha geniş aralık kaplamaktadır. Yani, artan grafen kaplama süresinin ara yüzeydeki grafen tabaka kalınlığını artırdığı mikroyapı görüntülerinde ortaya koyulmuştur.

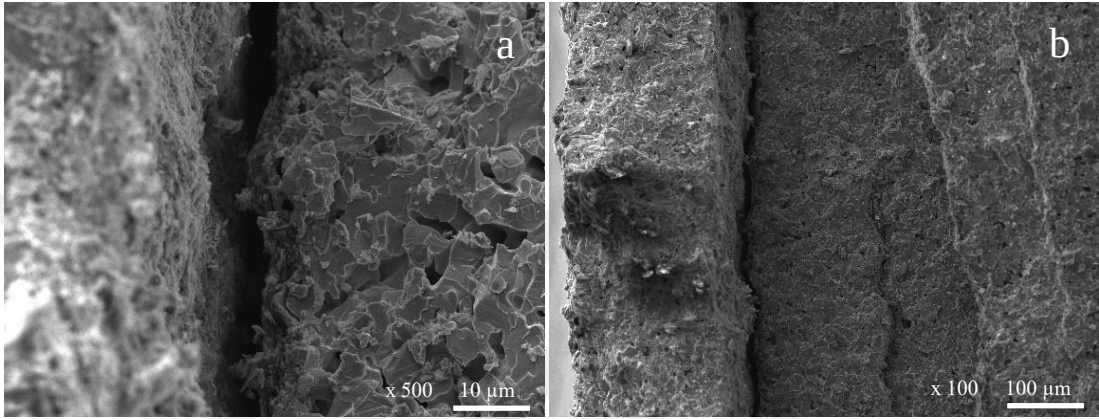


Şekil 5.14. Ti64 kompozitlere ait görüntüler: (a) 30 s, (b) 60 s ve (c) 90 s süre ile grafen kaplaması yapılmış numuneler

Bununla birlikte, artan grafen miktarına göre katmanlar arası ayrışmanın da arttığı görülmektedir. Ti64 kompozit malzemelerin grafen tabakalarının olduğu bölgelerden dolayı laminasyona maruz kaldığı ifade edilebilir. Bunun birkaç sebebi olabilir. Bunlardan birincisi; grafenin yapı itibarıyla katı yağlayıcı özelliğe sahip olmasıdır. Artan grafen miktarına bağlı olarak katı yağlayıcı özelliğinin arttığı ve dolayısıyla katmanlar arası kayma geriliminin azalarak çatlak oluşumuna sebep olduğu söylenebilir. Katmanların ayrışmasına sebep olan diğer husus termal genleşme farklılığıdır. Grafen ve Ti64’ün farklı termal genleşme özelliği sergilemesi nedeniyle

sinterleme işlemi sürecinde meydana gelen genleşme farklılığından dolayı çatlak oluşumu meydana gelmiştir. Bir diğer sebep ise, grafen miktarındaki artış ile birlikte aglomerasyon davranışı da artış göstermektedir. Bu da homojen olmayan lokal bölgeler meydana getirmekte ve çatlak oluşumunu artırmaktadır.

Şekil 5.15’de 90 saniye grafen kaplanan numunelere ait Ti64 kompozit yapıların SEM görüntüleri verilmiştir. Görüntülerde Ti64 katmanlarını ve ayrışma bölgelerini açıkça görmek mümkündür.



Şekil 5.15. Ti64 kompozitlere ait SEM görüntüleri; a) 500 kat, b) 100 kat büyütme yapılmış numuneler

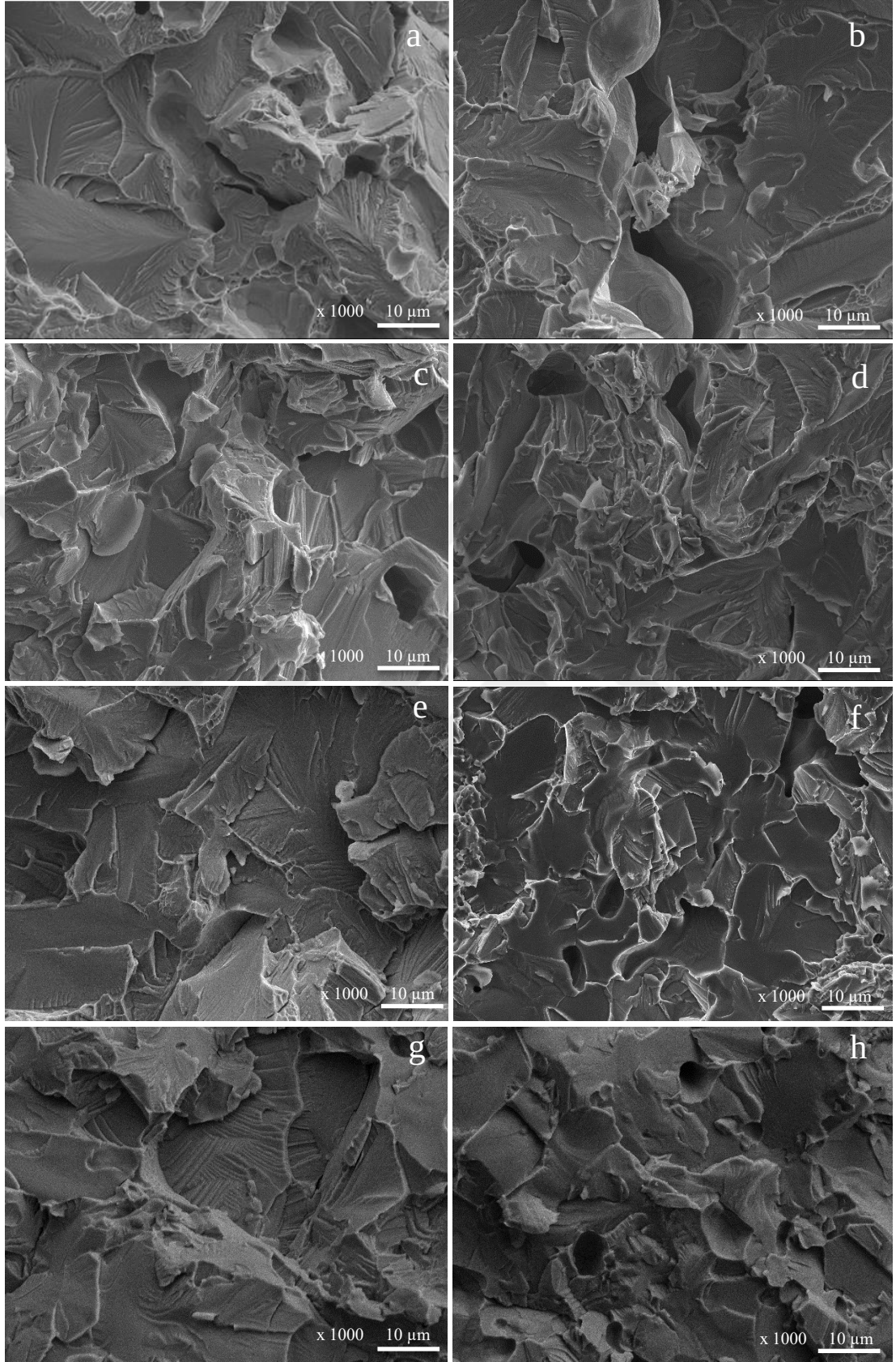
Yapılan mikroyapı incelemeleri neticesinde, grafen kaplama süresi çalışmaları için en iyi sonuç 30 saniye süre ile gerçekleştirilen kaplamaya sahip Ti64 kompozitinde ortaya koyulmuştur.

5.10.3. Şerit Dökümde Grafen Takviyesinin Malzeme Mikroyapısına Etkisi

Ti64 matrisli grafen takviyeli kompozitlerin üretilmesi sürecinde, iki farklı yöntem ile farklı oranlarda takviye edilen grafenin kompozit malzemenin mikroyapısına etkisi incelenmiştir. Şerit döküm sürecinde farklı oranlarda grafen takviyesi ve üretilen şeritlere spreyl kaplama şeklinde uygulanan grafen takviyesi olmak üzere iki yöntemin sonucunda elde edilen sekiz farklı numune için SEM ve EDS analizleri gerçekleştirilmiştir. Mikroyapı görüntüleri Şekil 5.16’da verilmiştir. Burada yapılan analizlerde, grafen katkısı %0 (Şekil 5.16 (a ve b)), %0,15 (Şekil 5.16 (c ve d)), %0,30 (Şekil 5.16 (e ve f)) ve %0,45 (Şekil 5.16 (g ve h)) olmak üzere bütün numune çiftlerine (arayüzey grafen kaplamalı ve kaplamasız) 1000 kat büyütme ile inceleme işlemi gerçekleştirilmiştir.

Görüntülerden de anlaşılacağı üzere taneler arası etkileşimin iyi düzeyde olduğu ve boyun oluşumunun gerçekleştiği görülmektedir. Genel olarak numunelerde yüksek yoğunluklu ve boşluk miktarının az olduğu bir mikroyapı mevcuttur. Ancak artan grafen oranına göre, grafen miktarının döküm içinde ve ara yüzeyde fazlalaşması boşluk oluşumunu artırmıştır. Bu da termal iletkenliğin belirli bir değerden sonra düşüş göstermesine neden olmuştur. En iyi termal iletkenlik sonuç 45-0 numunesinde ölçülmüştür. Ayrıca sertlik değerinin azalmasına da yol açarak en iyi sonucun 45-0 numunesinde ölçülmesine, artan değerde ise düşüş yaşanmasına neden olmuştur. Bunun yanı sıra aşınma dayanımının da azalmasına neden olmuştur. Aşınma dayanımı testlerinde en iyi sonuç 30-G numunesinde gözlenmiştir. Artan grafen miktarına göre aşınma dayanımı azalmıştır.

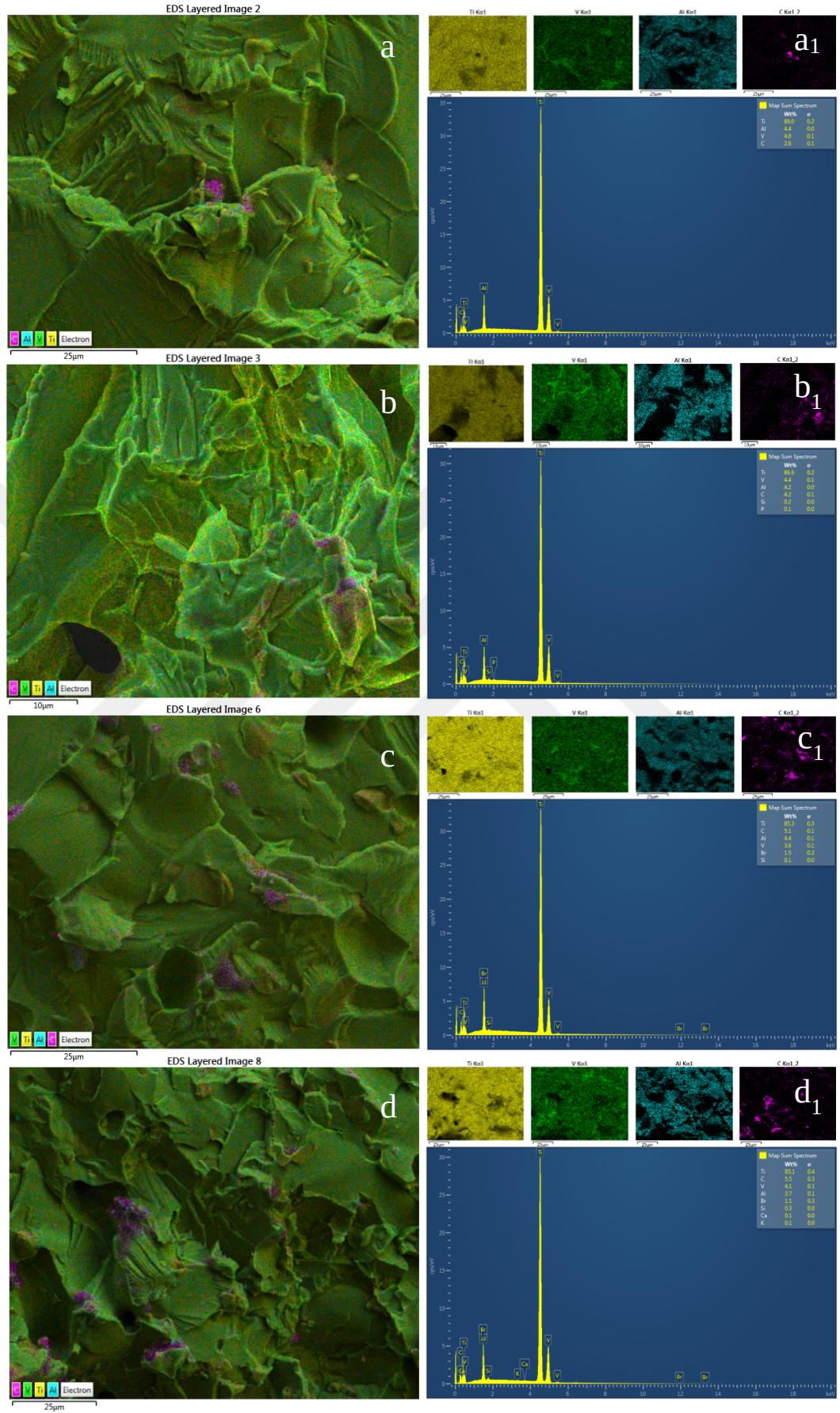




Şekil 5.16. Ti64 kompozitlere ait kırık yüzey SEM görüntüleri: (a) 0-0, (b) 0-G, (c) 15-0, (d) 15-G, (e) 30-0, (f) 30-G, (g) 45-0 ve (h) 45-G

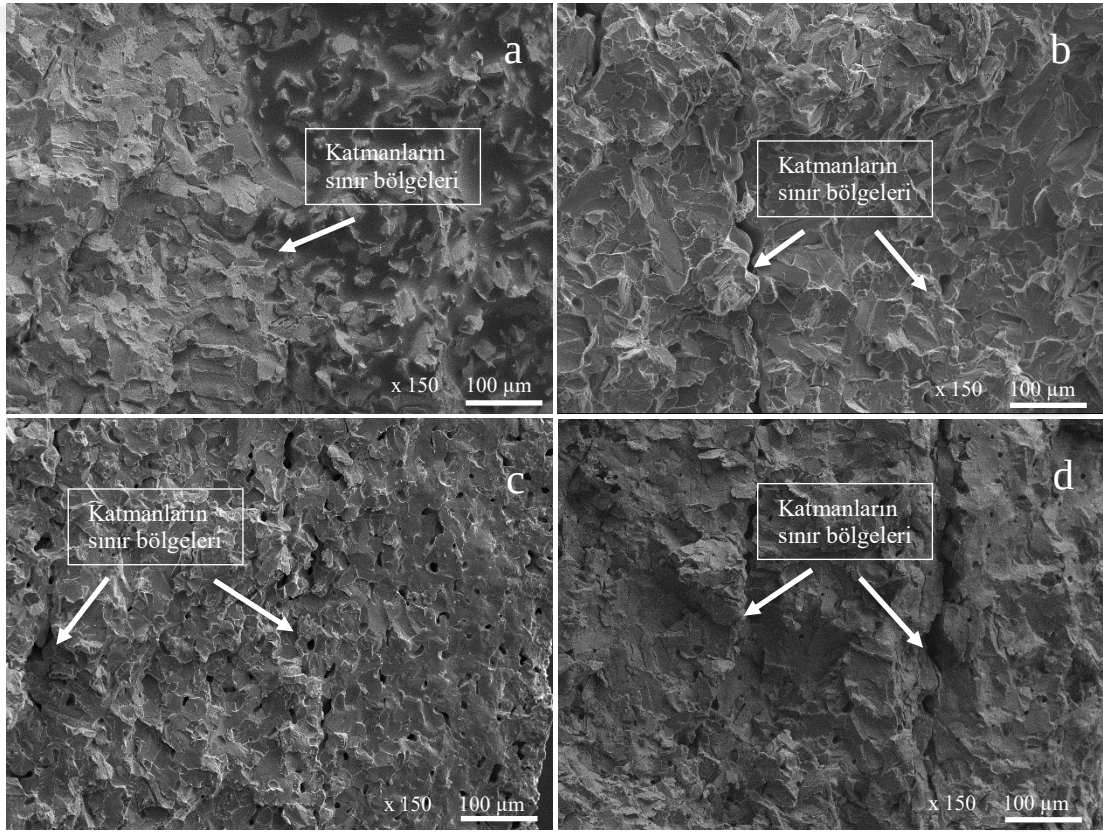
EDS analizleri ise Şekil 5.17’te verilmiştir. Grafen ve Ti64 yapılarının görüntülenmesi ve konumlanma özelliklerinin incelenmesi için analiz gerçekleştirilmiştir. İncelenmek üzere alınan numuneler arayüzeylerinde grafen takviyesi olan ve aynı zamanda içerisinde %0 (Şekil 5.17 (a)), %0,15 (Şekil 5.17 (b)), %0,30 (Şekil 5.17 (c)) ve %0,45 (Şekil 5.17 (d)) grafen takviyesi bulunan örneklerden oluşmaktadır. Grafenin kompozit içindeki varlığı açıkça görülmektedir. Ti64 tane sınırlarında yer alan grafen taneleri homojen dağılım göstermektedir. Ayrıca Ti, Al ve V oranları da belirlenmiş, istenmeyen ara fazların oluşumuna rastlanmamıştır.





Şekil 5.17. Ti64 kompozitlere ait SEM-EDS ve elementel dağılım görüntüleri: (a-a₁) 0-G, (b-b₁) 15-G, (c-c₁) 30-G ve (d-d₁) 45-G numuneleri

Şekil 5.18’de verilen SEM görüntülerinde arayüzeylerinde grafen takviyesi olan ve aynı zamanda içerisinde %0 (Şekil 5.18 (a)), %0,15 (Şekil 5.18 (b)), %0,30 (Şekil 5.18 (c)) ve %0,45 (Şekil 5.18 (d)) grafen takviyesi bulunan örneklerdeki katmanların ayrılma davranışı gözlenmiştir. Kırık yüzey görüntüleri incelenen katmanlı kompozit numunelerin 150 kat büyütme altında ara yüzeylerde sergiledikleri davranışları görülmektedir. Buna göre kompozit katmanlarının sınır bölgeleri ve laminasyon oluşumu görülmektedir. Grafen miktarının artmasına bağlı olarak katmanlardaki ayrışma miktarında artış gözlenmiştir. Bunun nedeni, termal genleşme farklılığı sonucu Ti64 ve grafen arasındaki gerilme farkı dolayısıyla ortaya çıkmaktadır. Ayrıca grafenin katı yağlayıcı özelliğinin artması nedeniyle laminasyonların oluşumu da artmaktadır.



Şekil 5.18. Farklı numunelere ait katmanlar arası ayrışma görüntüleri: (a) 0-G, (b) 15-G, (c) 30-G ve (d) 45-G numuneleri

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında Ti64 matrisli ve grafen takviyeli çok katmanlı şerit kompozit malzemeler üretilmiş ve karakterizasyon çalışmaları yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar şu şekildedir:

1. Döküm ünitesi laboratuvar ortamında düşük ebatlardaki şeritlerin üretilmesi için yeterli seviyededir. Farklı hızlarda ilerleme opsiyonu eklenen makinede aynı zamanda istenen kalınlıkta şerit üretimi için bıçak ayarı yapılabilmektedir.
2. Şerit döküm çamuru parametrelerinin en uygun koşullarda sağlandığı karışım oranı; %60 Ti64, %10 etanol, %10 ksilen, %3 PVB, %1 PEG ve %16 MEK kullanılan bileşim olmuştur.
3. Dağıtıcı olarak kullanılması optimize edilen balık yağının ise çamur içerisinde etkin bir bileşen olmadığı deneylerle saptanmıştır.
4. Şerit döküm işleminde altlık yüzey olarak kullanılması amacıyla bütün bu özellikleri sağlayan en kullanışlı malzeme Mylar film olarak deneylerle ortaya koyulmuştur.
5. 20, 40, 60 ve 80 bar değerlerinde basınç uygulanarak preslenen numunelerden en yüksek sertlik değeri 419,2 HV0,1 ile 80 bar altında preslenen numunede ölçülmüştür.
6. Grafen katkısının oranları Ti64'e göre ağırlıkça %0, %0,15, %0,30 ve %0,45 olarak belirlenmiştir.
7. Sertlik değerlerinin sonucunda 676,87 HV0,1 ile %0,45 grafen takviyesi en sert malzeme davranışı sergilemiştir.
8. Aşınma davranışına bakıldığında, en düşük aşınma oranının ara yüzeyde grafen yok iken $1,015 \times 10^{-5}$ mm³/Nm olarak hesaplandığı kompozit malzemenin %0,30 grafen takviyesi içeren numune olduğu görülmektedir. Ara yüzeyde grafen varlığında ise yine %0,30 grafen takviyesi içeren numunede $0,933 \times 10^{-5}$ mm³/Nm değeri ile en düşük aşınma oranı görülmektedir.
9. Termal iletkenlik davranışına göre, 30-G kodlu numune en yüksek termal iletkenlik özelliği sergilemiştir.
10. SEM görüntülerine göre, presleme basıncının artmasıyla birlikte daha homojen ve yoğun bir malzeme yapısı görülmektedir. Gözeneklilik ise basınç artışı ile birlikte büyük oranda azalmıştır.
11. Tanecik yapıları incelenecek olursa, az yoğun malzemede daha küresel bir

formda bulunan Ti64 taneleri, yoğunluk artışıyla birlikte daha çok köşeli bir geometri kazanmaya başlamıştır. Taneler arası etkileşim de büyük oranda artış göstermiştir.

12. Numunelere EDS analizi de yapılarak malzeme görüntüleri ortaya konmuştur. Ti, Al ve V atomlarının elementel haritaları çıkarılarak yüzdelik değerleri Ti6Al4V alaşımının değerleri ile aynı olduğu görülmüştür. Malzemenin kirliliği ise göz ardı edilecek düzeyde az meydana gelmiştir.
13. Ti64 kompozitlerin SEM görüntülerinde tane sınırlarına yerleşmiş grafen tabakaları net bir şekilde görülmektedir.
14. Belli bir değerden sonra artan grafen miktarına göre katmanlar arası ayrışmada artış meydana gelmiştir. Isıl işlem süreçlerinden geçirilmiş olan kompozit malzemelerde termal genleşme farklılığından dolayı grafen bölgeleri ve Ti64 bölgelerinde bu ayrışmalar görülmektedir.
15. Kaplama süresinin 30 saniyeden daha uzun sürelerle çıkması sonrası katmanların belirgin seviyede ayrıştığı görülmektedir. Optimum sürenin 30 s olduğu belirlenmiştir.

Sonuç olarak bu çalışmada, şerit döküm yöntemiyle grafen takviyeli ve çok katmanlı Ti64 kompozitlerin üretimi gerçekleştirilmiş; bu süreçte şerit döküm ünitesi de yine aynı tez çalışması kapsamında tasarlanmış ve üretilmiştir. Çalışma öncesinde ortaya koyulan hipotezlere göre; termal iletkenliği, sertliği ve aşınma dayanımı Ti64'e göre büyük oranlarda yüksek olan grafenin bu üstün özellikleri Ti64 kompozitlere de yansıyacaktı. Yapılan deneysel çalışmalar ve üretim sonrası gerçekleştirilen incelemeler gösterdi ki, çalışmanın başlangıcında ortaya koyulan bütün öngörüler gerçekten de grafenin üstün özelliklerinin Ti64'ün mekanik ve fiziksel özelliklerini güçlendirdiği yönünde olmuştur. Bu çalışma; havacılık, otomotiv, elektrik ve biyomedikal gibi sektörlerin en sık tercih edilen alaşımlarından olan Ti64'ün zayıf özelliklerinin, grafen takviyeli kompozit yapılar ile güçlendirilebileceği konusunda bir kez daha literatüre katkı sunmuştur.

Yapılan bu çalışmanın sonrasında elde edilen sonuçlardan da yola çıkılarak geliştirilmek istenen mekanik veya fiziksel özellikler yeni çalışmaların başlangıcını oluşturabilir. Buna göre çeşitli öneriler aşağıdaki gibi ortaya koyulabilir:

1. Takviye malzemesi olarak grafit, karbon nanotüp gibi farklı elemanlar kullanılarak karakterizasyon çalışmaları gerçekleştirilebilir.

2. Katmanlar arası ayrışmanın önüne geçebilmek için ara yüzey bağlayıcı eleman takviyesi ile katmanlı kompozit yapı üzerine çalışmalar gerçekleştirilebilir.
3. Katmanlama işlemi, yüzey kaplaması uygulanmış numunelerin kaplamalarının tam olarak kuruması beklenmeden gerçekleştirilebilir, böylelikle daha iyi bir tutunma sağlanabilir.
4. Kaplama işlemi elektrosprey yöntemiyle gerçekleştirilen bu çalışma için farklı kaplama teknikleri uygulanarak performans değerlendirmesi yapılabilir.
5. Havacılık, elektronik ve otomotiv sektörleri başta olmak üzere elektrik iletim özelliğinin önemli olduğu sektörlerde kullanılmak üzere üretilen bu malzemelere elektriksel iletkenlik davranışını gözlemlemek adına testler uygulanabilir.

KAYNAKLAR

- Acton, Q. A. (2012). *Advances in ethanol research and application*, Scholarly Editions.
- Arunkumar, K. V., Panicker, R. N., Vasanthakumari, K. G., Satheesh, M., Raghu, N., & Unnikrishnan, N. V. (2010). "Dispersion and rheological characterization of TiO₂ tape casting slurry". *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 7(6), 902-908. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7402.2009.02386.x>
- Ayers, R., Burkes, D., Gottoli, G., Yi, H. C., & Moore, J. J. (2007). "The application of self-propagating high-temperature synthesis of engineered porous composite biomedical materials". *Materials and Manufacturing Processes*, 22(4), 481-488. <https://doi.org/10.1080/10426910701235967>
- Baker, A., Lanagan, M., Randall, C., Semouchkina, E., Semouchkin, G., Rajab, K. Z., & Eitel, R. (2005). "Integration concepts for the fabrication of LTCC structures". *International Journal of Applied Ceramic Technology*.
- Banerjee, D., & Williams, J. C. (2013). "Perspectives on titanium science and technology". *Acta Materialia*, 61(3), 844-879. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2012.10.043>
- Bauri, R., & Yadav, D. (2017). *Metal matrix composites by friction stir processing* (1st ed.).
- Bidaux, J. E., García-Gómez, J., Hamdan, H., Zufferey, D., Rodriguez-Arbaizar, M., Girard, H., & Carreño-Morelli, E. (2011). "Tape casting of porous titanium thin sheets from titanium hydride". *Proceedings of the Euro International Powder Metallurgy Congress and Exhibition, Euro PM 2011*, 2(October).
- Bignon, Q., Martin, F., Auzoux, Q., Miserque, F., Tabarant, M., Latu-Romain, L., & Wouters, Y. (2019). "Oxide formation on titanium alloys in primary water of nuclear pressurised water reactor". *Corrosion Science*, 150, 32-41. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2019.01.020>
- Bitterlich, B., & Heinrich, J. G. (2002). "Aqueous tape casting of silicon nitride". *Journal of the European Ceramic Society*, 22(13), 2427-2434. [https://doi.org/10.1016/S0955-2219\(02\)00029-8](https://doi.org/10.1016/S0955-2219(02)00029-8)
- Boulos, M. I. (1992). "Rf induction plasma spraying: State of the art review". *ASM International, Materials Park, Ohio 44073, USA, 1990. 1063, 1(1)(33)*.
- Boyer, R., Welsch, G., & Collings, E. W. (1994). *Materials properties handbook : Titanium alloys*.
- Boyer, R. R. (1996). "An overview on the use of titanium in the aerospace industry". *Materials Science and Engineering A*, 213(1-2), 103-114. [https://doi.org/10.1016/0921-5093\(96\)10233-1](https://doi.org/10.1016/0921-5093(96)10233-1)
- Cans, M., Hamdam, H., Öner, Y., Bidaux, J. E., & Carreño-Morelli, E. (2008). "Tape casting of copper alloys for tribological applications". *Proceedings of the Euro International Powder Metallurgy Congress and Exhibition, Euro PM 2008*, 1(September 2008), 27-32.
- Cao, X., Liu, X., Ren, Z., Guo, J., Yi, X., Wang, H., & Yang, J. (2023). "Microstructure evolution, mechanical properties, and wear behavior of in-situ TiCx/TC₄ composites". *Vacuum*, 217. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2023.112516>
- Cao, Z., Wang, X., Li, J., Wu, Y., Zhang, H., Guo, J., & Wang, S. (2017). "Reinforcement with graphene nanoflakes in titanium matrix composites". *Journal of Alloys and Compounds*, 696, 498-502. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.11.302>
- Chawla, K. K. (1993). *Ceramic matrix composites* (Vol. 1). Springer-Science+Business Media, BV.

- Christodoulou, L., Parrish, P. A., & Crowe, C. R. (1988). "Titanium aluminide composites". *MRS Online Proceedings Library*, 120.
- Corral, E. L., Ayala, A., Loehman, R. E., Shah, R., Reiterer, M., & Bencoe, D. (2008). "Tape casting of magnesium oxide". (February).
- Courant, B., Hantzpergue, J. J., & Benayoun, S. (1999). "Surface treatment of titanium by laser irradiation to improve resistance to dry-sliding friction". *Wear*, (236), 39-46.
- Dasari, B. L., Morshed, M., Nouri, J. M., Brabazon, D., & Naher, S. (2018). "Mechanical properties of graphene oxide reinforced aluminium matrix composites". *Composites Part B: Engineering*, 145, 136-144. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.03.022>
- Daudt, N. F., Hackemüller, F. J., & Bram, M. (2019). "Manufacturing of ti-10nb based metal sheets by tape casting". *Materials Letters*, 237, 161-164. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2018.11.109>
- Dernovsek, O., Naeini, A., Preu, G., Wersing, W., Eberstein, M., & Schiller, W. A. (2001). "Ltcc glass-ceramic composites for microwave application".
- Donachie, M. J. (2000). *Titanium-a technical guide* (2. ed.). ASM International.
- Dong, D., Zhu, D., Zheng, H., Wang, G., Xu, H., Lin, F., He, Q., & Ni, C. (2018). "Brazing tic/ti matrix composite using ti ni eutectic braze alloy". *Vacuum*, 156, 411-418. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2018.08.012>
- Frazier, W. E. (2014). "Metal additive manufacturing: A review". *Journal of Materials Engineering and Performance*, 23(6), 1917-1928. <https://doi.org/10.1007/s11665-014-0958-z>
- Gamsız, K., Korkut, A. Y., & Kop, A. (2019). "Comparison of fatty acid compositions of commercial fish and fish by-products oils used in fish feed industry in turkey". *Turkish Journal of Agriculture - Food Science and Technology*, 7(11), 1941-1946. <https://doi.org/10.24925/turjaf.v7i11.1941-1946.2901>
- Ghannadi, S., Abdizadeh, H., & Babaei, A. (2020). "Fabrication of porous titania sheet via tape casting: Microstructure and water permeability study". *Ceramics International*, 46(7), 8689-8694. <https://doi.org/10.1016/J.CERAMINT.2019.12.103>
- Godfrey, T. M. T., Goodwin, P. S., & Ward-Close, C. M. (2000). "Titanium particulate metal matrix composites-reinforcement, production methods, and mechanical properties". *Advanced Engineering Materials*.
- Guo, X., Wang, L., Wang, M., Qin, J., Zhang, D., & Lu, W. (2012). "Effects of degree of deformation on the microstructure, mechanical properties and texture of hybrid-reinforced titanium matrix composites". *Acta Materialia*, 60(6-7), 2656-2667. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2012.01.032>
- Gürbüz, M., Can Şenel, M., & Koç, E. (2018). "The effect of sintering time, temperature, and graphene addition on the hardness and microstructure of aluminum composites". *Journal of Composite Materials*, 52(4), 553-563. <https://doi.org/10.1177/0021998317740200>
- Gürbüz, M., & Mutuk, T. (2017). "Effect of process parameters on hardness and microstructure of graphene reinforced titanium composites". *Journal of Composite Materials*.
- Gürbüz, M., Mutuk, T., & Uyan, P. (2020). "Mechanical, wear and thermal behaviors of graphene reinforced titanium composites". *Metals and Materials International*(0123456789), 1-9. <https://doi.org/10.1007/s12540-020-00673-1>

- Hackemüller, F. J., Borgardt, E., Panchenko, O., Müller, M., & Bram, M. (2019). "Manufacturing of large-scale titanium-based porous transport layers for polymer electrolyte membrane electrolysis by tape casting". *Advanced Engineering Materials*, 21(6), 1-10. <https://doi.org/10.1002/adem.201801201>
- Hafeez, N., Liu, S., Lu, E., Wang, L., Liu, R., lu, W., & Zhang, L.-C. (2019). "Mechanical behavior and phase transformation of β -type ti-35nb-2ta-3zr alloy fabricated by 3d-printing". *Journal of Alloys and Compounds*, 790, 117-126. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.03.138>
- Hayat, M. D., Singh, H., He, Z., & Cao, P. (2019). "Titanium metal matrix composites: An overview". *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 121, 418-438. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2019.04.005>
- Holt, J. M., Mindlin, H., & Ho, C. Y. (1996). *Structural alloys handbook*.
- Hu, Z., Tong, G., Nian, Q., Xu, R., Saei, M., Chen, F., Chen, C., Zhang, M., Guo, H., & Xu, J. (2016). "Laser sintered single layer graphene oxide reinforced titanium matrix nanocomposites". *Composites Part B: Engineering*, 93, 352-359. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.03.043>
- Huang, L. J., Geng, L., & Peng, H. X. (2010). "In situ (tibw+ticp)/ti6al4v composites with a network reinforcement distribution". *Materials Science and Engineering: A*, 527(24-25), 6723-6727. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2010.07.025>
- Huang, Z., Yang, Y., Lv, H., Shi, C., Li, T., Ling, Y., Chen, T., & Wang, S. (2023). "Large-area anode-supported protonic ceramic fuel cells combining with multilayer-tape casting and hot-pressing lamination technology". *Journal of the European Ceramic Society*, 43(2), 428-437. <https://doi.org/10.1016/J.JEURCERAMSOC.2022.09.057>
- Jingxian, Z., Dongliang, J., Weisensel, L., & Greil, P. (2004). "Binary solvent mixture for tape casting of TiO₂ sheets". *Journal of the European Ceramic Society*, 24(1), 147-155. [https://doi.org/10.1016/S0955-2219\(03\)00340-6](https://doi.org/10.1016/S0955-2219(03)00340-6)
- Karthick, E., Mathai, J., Michael Tony, J., & Marikkannan, S. K. (2017, 2017-01). Processing, microstructure and mechanical properties of Al₂O₃ and SiC reinforced magnesium metal matrix hybrid composites.
- Kondoh, K. (2015). Titanium metal matrix composites by powder metallurgy (pm) routes. In *Titanium powder metallurgy* (pp. 277-297). <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-800054-0.00016-2>
- Kondoh, K., Fukuda, H., Umeda, J., Imai, H., Fugetsu, B., & Endo, M. (2010). "Microstructural and mechanical analysis of carbon nanotube reinforced magnesium alloy powder composites". *Materials Science and Engineering A*, 527(16-17), 4103-4108. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2010.03.049>
- Li, N., Cui, C., Liu, S., Liu, S., Cui, S., & Wang, Q. (2017). "Microstructure and mechanical properties of ti6al4v alloy modified and reinforced by in situ Ti₅Si₃/Ti composite ribbon inoculants". *Metals*, 7(7). <https://doi.org/10.3390/met7070267>
- Liu, Y. J., Li, S. J., Wang, H. L., Hou, W. T., Hao, Y. L., Yang, R., Sercombe, T. B., & Zhang, L. C. (2016). "Microstructure, defects and mechanical behavior of beta-type titanium porous structures manufactured by electron beam melting and selective laser melting". *Acta Materialia*, 113, 56-67. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.04.029>
- Lobley, C. M., & Quo, Z. X. (1998). "Processing of ti-sic metal matrix composites by tape casting". *Materials Science and Technology*, 14(9), 1024-1028. <https://doi.org/10.1179/mst.1998.14.9-10.1024>
- Lütjering, G., & Williams, J. C. (2007). *Titanium matrix composites*. Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-73036-1_9

- Mistler, R. E. (1995). "The principles of tape casting and tape casting applications". *Ceramic Processing*, 147-173. https://doi.org/10.1007/978-94-011-0531-6_5
- Mu, X. N., Zhang, H. M., Cai, H. N., Fan, Q. B., Zhang, Z. H., Wu, Y., Fu, Z. J., & Yu, D. H. (2017). "Microstructure evolution and superior tensile properties of low content graphene nanoplatelets reinforced pure ti matrix composites". *Materials Science and Engineering A*, 687, 164-174. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.01.072>
- Niinomi, M. (1998). "Mechanical properties of biomedical titanium alloys". *Materials Science and Engineering A*, 243(1-2), 231-236. [https://doi.org/10.1016/s0921-5093\(97\)00806-x](https://doi.org/10.1016/s0921-5093(97)00806-x)
- Olabisi, O., & Adewale, K. (2016). "Handbook of thermoplastics". *CRC Press*.
- Pank, D. R., & Jackson, J. J. (1993). "Metal-matrix composite processing technologies for aircraft engine applications". *ASM International, Materials Park, Ohio 44073, USA*, 1990. 1063, 2(3), 341.
- Peters, M., Kumpfert, J., Ward, C. H., & Leyens, C. (2003). "Titanium alloys for aerospace applications". *Advanced Engineering Materials*, 5(6), 419-427. <https://doi.org/10.1002/adem.200310095>
- Prakash, K. S., Balasundar, P., Nagaraja, S., Gopal, P. M., & Kavimani, V. (2016). "Mechanical and wear behaviour of Mg-SiC-Gr hybrid composites". *Journal of Magnesium and Alloys*, 4(3), 197-206.
- Prashanth, S., Subbaya, K., Nithin, K., & Sachhidananda, S. (2017). "Fiber reinforced composites - a review". *Journal of Material Science & Engineering*, 06(03). <https://doi.org/10.4172/2169-0022.1000341>
- Qian, M., Goh, C. S., Sun, Y. H., & Ng, F. L. (2013). "Effects of cnts on microstructure and hardness of laser welds of the cnt-reinforced magnesium composite". *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 48(1), 67-72. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2013.01.013>
- Rak, Z. S., & Walter, J. (2006). "Porous titanium foil by tape casting technique". *Journal of Materials Processing Technology*, 175(1-3), 358-363. <https://doi.org/10.1016/J.JMATPROTEC.2005.04.066>
- Rashad, M., Pan, F., Asif, M., & Tang, A. (2014). "Powder metallurgy of mg-1%al-1%sn alloy reinforced with low content of graphene nanoplatelets (GNPs)". *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 20(6), 4250-4255. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2014.01.028>
- Rashad, M., Pan, F., Hu, H., Asif, M., Hussain, S., & She, J. (2015). "Enhanced tensile properties of magnesium composites reinforced with graphene nanoplatelets". *Materials Science and Engineering A*, 630, 36-44. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2015.02.002>
- Rashad, M., Pan, F., Lin, D., & Asif, M. (2016). "High temperature mechanical behavior of az61 magnesium alloy reinforced with graphene nanoplatelets". *Materials and Design*, 89, 1242-1250. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.10.101>
- Rashad, M., Pan, F., Tang, A., Lu, Y., Asif, M., Hussain, S., She, J., Gou, J., & Mao, J. (2013). "Effect of graphene nanoplatelets (gnps) addition on strength and ductility of magnesium-titanium alloys". *Journal of Magnesium and Alloys*, 1(3), 242-248. <https://doi.org/10.1016/j.jma.2013.09.004>
- Rashad, M., Pan, F., Yu, Z., Asif, M., Lin, H., & Pan, R. (2015). "Investigation on microstructural, mechanical and electrochemical properties of aluminum composites reinforced with graphene nanoplatelets". *Progress in Natural Science: Materials International*, 25(5), 460-470. <https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2015.09.005>

- Rauscher, M., Besendörfer, G., & Roosen, A. (2008). "Steel-sheet fabrication by tape casting". *International Journal of Powder Metallurgy (Princeton, New Jersey)*, 44(6), 39-48.
- Ren, L., Luo, X., & Zhou, H. (2018). "The tape casting process for manufacturing low-temperature co-fired ceramic green sheets: A review". *Journal of the American Ceramic Society*, 101(9), 3874-3889. <https://doi.org/10.1111/JACE.15694>
- Ren, Z., Liu, W., An, Q., Chen, X., Wei, G., Chen, R., Zhang, R., Huang, L., & Geng, L. (2023). "Microstructures and tensile properties of low-cost tibw/ti-6al-4v composites by vacuum reactive hot pressing". *Vacuum*, 211. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2023.111921>
- Rincón, A., Chinelatto, A. S. A., & Moreno, R. (2014). "Tape casting of alumina/zirconia suspensions containing graphene oxide". *Journal of the European Ceramic Society*, 34(7), 1819-1827. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2013.12.027>
- Ru, J., Kong, B., Zhu, H., Shi, Z., Zhang, D., & Fan, T. (2014). "Microstructure, capillary performance and gas permeability of biporous copper fabricated by tape casting". *Powder Technology*, 256, 182-187. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2014.02.009>
- Sayın, E. (2020). *Grafen-Si₃N₄ takviyeli Ti6Al4V matrisli hibrit kompozitlerin üretimi ve karakterizasyonu*
- Sebastian, M. T., Ubig, R., & Jantunen, H. (2015). "Low-loss dielectric ceramic materials and their properties". *International Materials Reviews*, 60(7), 392-412. <https://doi.org/10.1179/1743280415y.0000000007>
- Sebastian, M. T., Wang, H., & Jantunen, H. (2016). "Low temperature co-fired ceramics with ultra-low sintering temperature: A review". *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, 20(3), 151-170. <https://doi.org/10.1016/j.cossms.2016.02.004>
- Selva, S., Bignon, Q., Raynal, A., Martin, F., Auzoux, Q., Renou, G., Tabarant, M., Miserque, F., Latu-Romain, L., & Wouters, Y. (2021). "Corrosion of titanium alloys in pressurised water at 300°C: Kinetics and modelling". *Corrosion Science*, 190. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2021.109646>
- Şenel, M. C. G., Mevlüt; Koç, Erdem. (2015). "Grafen takviyeli alüminyum matrisli yeni nesil kompozitler". *Mühendis ve Makina*, 56(669), 36-46.
- Shalnova, S. A., Volosevich, D. V., Sannikov, M. I., Magidov, I. S., Mikhaylovskiy, K. V., Turichin, G. A., & Klimova-Korsmik, O. G. (2022). "Direct energy deposition of sic reinforced Ti-6Al-4V metal matrix composites: Structure and mechanical properties". *Ceramics International*, 48(23), 35076-35084. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.08.097>
- Singerman, S. A., & Jackson, J. J. (2012, 2012). Titanium metal matrix composites for aerospace applications. Superalloys 1996, Proceedings of Eighth International Symposium on Superalloys,
- Singh, H., Hayat, M. D., Zhang, H., & Cao, P. (2019). "The decomposition of Si₃N₄ in titanium and its effect on wear properties". *Wear*, 420-421, 87-95. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2018.12.094>
- Snel, M. D., Snijkers, F., Luyten, J., Kodentsov, A., & de With, G. (2008). "Tape casting and reaction sintering of titanium-titanium oxide-nickel oxide mixtures". *Journal of the European Ceramic Society*, 28(6), 1185-1190. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2007.11.001>
- Song, Y., Chen, Y., Liu, W. W., Li, W. L., Wang, Y. G., Zhao, D., & Liu, X. B. (2016). "Microscopic mechanical properties of titanium composites containing multi-layer graphene nanofillers". *Materials and Design*, 109, 256-263. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.07.077>

- Srivatsan, T. S., Sudarshan, T. S., & Lavernia, E. J. (1995). "Processing of discontinuously-reinforced metal matrix composites by rapid solidification". *Progress in Materials Science*, 39, 317-409.
- Staab, G. H. (2015). *Laminar composites* (2. ed.).
- Turan, M. E., Sun, Y., Akgul, Y., Turen, Y., & Ahlatci, H. (2017). "The effect of gnps on wear and corrosion behaviors of pure magnesium". *Journal of Alloys and Compounds*, 724, 14-23. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.07.022>
- Vasudev, A., Kaushik, A., Jones, K., & Bhansali, S. (2012). "Prospects of low temperature co-fired ceramic (ltcc) based microfluidic systems for point-of-care biosensing and environmental sensing". *Microfluidics and Nanofluidics*, 14(3-4), 683-702. <https://doi.org/10.1007/s10404-012-1087-3>
- Venkatesh, P. H. J., Tarun, M., srinivas, K., Santosh Kumar, G., Amda, S., & Swapna, Y. (2023). "The experimental investigation of thermal conductivity of aluminum metal matrix composites". *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.07.249>
- Wang, R.-M., Zheng, S.-R., & Zheng, Y.-P. (2011). *Polymer matrix composites and technology*. Woodhead Publishing.
- Weng, Z., Gu, K., Cui, C., Cai, H., Liu, X., & Wang, J. (2020). "Microstructure evolution and wear behavior of titanium alloy under cryogenic dry sliding wear condition". *Materials Characterization*, 165. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2020.110385>
- Wood, M., & Ward-Close, M. (1995). "Fibre-reinforced intermetallic compounds by physical vapour deposition". *Materials Science and Engineering A*, 192/193, 590-596.
- Yang, W., Zhao, Q., Xin, L., Qiao, J., Zou, J., Shao, P., Yu, Z., Zhang, Q., & Wu, G. (2018). "Microstructure and mechanical properties of graphene nanoplates reinforced pure al matrix composites prepared by pressure infiltration method". *Journal of Alloys and Compounds*, 732, 748-758. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.10.283>
- Yin, F., Ma, S., Hu, S., Liu, Y., Hua, L., & Cheng, G. J. (2023). "Understanding the microstructure evolution and mechanical behavior of titanium alloy during electrically assisted plastic deformation process". *Materials Science and Engineering: A*, 869. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2023.144815>
- Zeng, Y. P., Jiang, D. L., & Watanabe, T. (2000). "Fabrication and properties of tape-cast laminated and functionally gradient alumina-titanium carbide materials". *Journal of the American Ceramic Society*, 83(12), 2999-3003. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.2000.tb01673.x>
- Zhai, W., Shi, X., Wang, M., Xu, Z., Yao, J., Song, S., & Wang, Y. (2014). "Grain refinement: A mechanism for graphene nanoplatelets to reduce friction and wear of ni3al matrix self-lubricating composites". *Wear*, 310(1-2), 33-40. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2013.12.014>
- Zhai, W., Shi, X., Yao, J., Ibrahim, A. M. M., Xu, Z., Zhu, Q., Xiao, Y., Chen, L., & Zhang, Q. (2015). "Investigation of mechanical and tribological behaviors of multilayer graphene reinforced ni3al matrix composites". *Composites Part B: Engineering*, 70, 149-155. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.10.052>
- Zhang, B., Zhong, Z., Ye, J., Liu, Q., Hou, Z., Jin, Y., Zhang, H., Wang, Y., Zhang, Z., & Ye, F. (2020). "Microstructure and anti-penetration performance of continuous gradient Ti/TiB–TiB₂ composite fabricated by spark plasma sintering combined with tape casting". *Ceramics International*, 46(7), 9957-9961. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.12.125>

- Zhang, L., Sun, D., & Xiong, R. (2020). "Study of corrosion kinetics and microstructure of α -phase pure titanium tube in environment 300°C and 8.6mpa water". *Corrosion Science*, 162. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2019.108217>
- Zuo, K. H., Jiang, D. L., Zhang, J. x., & Lin, Q. L. (2007). "Forming nanometer tio₂ sheets by nonaqueous tape casting". *Ceramics International*, 33(3), 477-481. <https://doi.org/10.1016/J.CERAMINT.2005.10.013>



ÖZGEÇMİŞ

Emine Özlem DENGİZ, Eskişehir Fatih Anadolu Lisesi'ni bitirdikten sonra Pamukkale Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi, Fizik bölümünden 25.06.2011 tarihinde mezun oldu. 2013 yılında Ondokuz Mayıs Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği bölümüne başlayarak 2015 yılında lisans programından mezun oldu. Aynı yıl OMÜ LEE Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı Yüksek Lisans programına girdi. 2018 yılında yüksek lisans eğitimini tamamlayarak aynı Ana Bilim Dalında doktora programına başladı. Mezuniyetinden bu yana Samsun Üniversitesi Kavak Meslek Yüksekokulunda öğretim görevlisi olarak görev yapan Emine Özlem DENGİZ, çeşitli önlisans programlarında dersler vermiştir. OMÜ BAP, TÜBİTAK, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, Gençlik ve Spor Bakanlığı tarafından fonlanan projelerde yürütücülük ve araştırmacılık görevi üstlenmiş, lisansüstü burs programlarından yararlanmış ve çalıştığı kurumda MYO Müdür Yardımcılığı, komisyon başkanlıkları gibi idari görevlerde yer almıştır.

İletişim Bilgileri:

ORCID ID : 0000-0002-2889-008X

Yayınlar:

1. E.Ö. Dengiz M. Gürbüz, Şerit Döküm Yöntemiyle Tek Katmanlı ve Çok Katmanlı Yapıda Malzeme Üretimi, Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi, Yıl 2023, Cilt: 13 Sayı: 4, 1807 - 1823, <https://doi.org/10.31466/kfbd.1337108>
2. Dengiz vd., Katmanlı Ti64 Tabakalarının Üretimine Yönelik Şerit Döküm Bulamacının Optimizasyonu, ICEANS 2022, Konya, Turkey

Projeler:

1. 122B590, Multidisipliner Bilim Kampı, Araştırmacı/Uzman, Sonuçlandı, bilim Ve Toplum Başkanlığı Programlar Müdürlüğü, Bilim ve Toplum / 4004 - Doğa Eğitimi ve Bilim Okulları, BİLİM TOPLUM, Projeye Katılma/Ayrılma Tarihleri: 01.07.2022 -Sona Erdi, Proje Başlangıç/Bitiş Tarihleri: 01.07.2022 - 01.07.2023.

2. 121B559, Samsun Üniversitesi Havacılık Ve Uzay Bilimleri Kampı (Samü-Hub Kamp), Araştırmacı/Uzman, Sonuçlandı, bilim Ve Toplum Başkanlığı Programlar Müdürlüğü, Bilim ve Toplum / 4004 - Doğa Eğitimi ve Bilim Okulları, BİLİM TOPLUM, Projeye Katılma/Ayrılma Tarihleri: 01.07.2021 - Sona Erdi, Proje Başlangıç/Bitiş Tarihleri: 01.07.2021 - 01.07.2022.
3. TÜBİTAK, 2209-B Üniversite Öğrencileri Sanayiye Yönelik Araştırma Projeleri Destekleme Programı, 2022/1, Şerit Döküm Cihazı Tasarımı ve Üretimi, 1139B412200662
4. TÜBİTAK, 2209-B Üniversite Öğrencileri Sanayiye Yönelik Araştırma Projeleri Destekleme Programı, 2022/1, Grafen Takviyeli Magnezyum Kompozitlerin Biyomedikal Amaçlı Üretimi, Aşınma ve Biyouyumluluk Çalışmaları, 1139B412200819
5. TÜBİTAK, 2209-B Üniversite Öğrencileri Sanayiye Yönelik Araştırma Projeleri Destekleme Programı, 2021/3, Atık Elektropolisaj Karışımı İçerisindeki Metal Partiküllerin Ayrıştırılması ve Geri Kazanımı, 1139B412103001
6. OMÜ BAP, PYO.MUH.1901.22.003, Şerit Döküm Yöntemiyle Ti64 Kompozitlerin Üretimi ve Karakterizasyonu
7. OMÜ BAP, PYO.MUH.1904.17.010, Grafen Takviyeli Magnezyum Kompozitlerin Üretimi ve Karakterizasyonu

Kazanılan Ödüller, Teşvikler ve Burslar

1. TÜBİTAK Münir Bırsel Yükseköğrenim Bursu, Emine Özlem DENGİZ, Doktora Burs Programı, 2018