



T.C

ALANYA ALAADDİN KEYKUBAT ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**TOZ METALURJİSİ METODUYLA ÜRETİLEN Ti-6Al-4V MATRİSLİ KARBON
NANOTÜP TAKVİYELİ KOMPOZİT MALZEMELERDE ÇÖKELME
SERTLEŞMESİ**

Yüksek Lisans Tezi

Berat YILMAZ

**Danışman
Doç. Dr. İsmail TOPCU**

**ALANYA
2026**

T.C.
ALANYA ALAADDİN KEYKUBAT ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**TOZ METALURJİSİ METODUYLA ÜRETİLEN Tİ-6AL-
4V MATRİSLİ KARBON NANOTÜP TAKVİYELİ
KOMPOZİT MALZEMELERDE ÇÖKELME
SERTLEŞMESİ**

Yüksek Lisans Tezi

Berat YILMAZ

Anabilim Dalı: Metalurji ve Malzeme Mühendisliği

Program Adı: Metalurji ve Malzeme Mühendisliği

Danışman
Doç. Dr. İsmail TOPCU

ALANYA
(2026)

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; bu çalışma kapsamında elde edilemeyen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi; bu çalışmanın Alanya Alaaddin Keykubat Üniversitesi tarafından kullanılan “bilimsel intihal tespit programıyla tarandığını ve “intihal içermediğini” beyan ederim. Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçlara razı olduğumu bildiririm.

Berat YILMAZ

TEŞEKKÜR SAYFASI

Her konuda sabır ve sevgiyle yaklaşan, bildiklerini büyük bir zevkle aktaran ve hem maddi hem de manevi destek olan saygıdeğer hocam Doç. Dr. İsmail Topçu'ya kariyerimde uzmanlaşmam için yaptığı tüm yardımlar için sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Laboratuvar çalışmalarında yardımcı olan Doç. Dr. Ethem İlhan ŞAHİN ve Dr. Mehmet Masum TÜNÇAY hocalarıma teşekkürlerimi sunarım.

Öğretim hayatım boyunca yardımlarını esirgemeyen ve bana hep inanan annem Meryem YILMAZ, babam Savaş YILMAZ'a destekleri için teşekkür ederim.

Berat YILMAZ

ÖZET

TOZ METALURJİSİ METODUYLA ÜRETİLEN Ti-6Al-4V MATRİSLİ KARBON NANOTÜP TAKVİYELİ KOMPOZİT MALZEMELERDE ÇÖKELME SERTLEŞMESİ İŞLEMİNİN ETKİSİ

Berat YILMAZ

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği

Alanya Alaaddin Keykubat Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Ocak, 2026 (40 Sayfa)

Bu tez çalışmasında, toz metalurjisi yöntemiyle üretilen Ti-6Al-4V matrisli karbon nanotüp (KNT) takviyeli kompozit malzemelerin mekanik ve elektromanyetik özelliklerine, çökelme sertleşmesi ısıl işleminin etkileri araştırılmıştır. Üç farklı KNT oranında (%1, %3 ve %5) kompozitler, 1275 °C’de farklı sürelerde sinterlenmiştir. Çökelme sertleşmesi süreci, 950 °C’de 1 saat çözündürme tavı ve hızlı su verme işleminin ardından, 480 °C’de 5 saat yaşlandırma adımlarından oluşmuştur. Mekanik özelliklerin belirlenmesi amacıyla yapılan mikrosertlik ölçümleri, çökelme sertleşmesi işleminin sertliği artırdığını göstermiştir. Çözeltiye alma sonrası tüm numunelerde sertlik artışı gözlenmiş; yaşlandırma işlemi sonrası ise düşük KNT oranlı numunelerde (1 ve 3%) hafif düşüş, yüksek KNT oranlı (%5) numunede ise sertlik artışı devam etmiştir. Elektromanyetik performans, 0–4.4 GHz frekans aralığında ekranlama etkinliği (SE) ve yansıma kaybı (RL) ölçümleri ile değerlendirilmiştir. Sonuçlar, çökelme sertleşmesi sonrası tüm numunelerde SE ve RL değerlerinde belirgin bir azalma olduğunu göstermiştir. Bu azalma, numune kalınlığının 5 mm’den 3,5 mm’ye düşmesinin yanı sıra matris/ara yüzey etkileşimlerindeki değişim ve çökelme sırasında KNT dağılımında meydana gelen mikroyapısal farklılıklardan kaynaklanabilir. Elde edilen sonuçlar, KNT takviyesinin ve çökelme sertleşmesinin Ti-6Al-4V kompozitlerinin mekanik özelliklerini geliştirdiğini, ancak elektromanyetik ekranlama ve yansıma performansında işlem sonrası bazı olumsuz etkiler oluşturduğunu göstermektedir. Bu bulgular, savunma sanayi, havacılık ve elektromanyetik koruma uygulamalarında malzeme tasarımında önemli bilgiler sağlamaktadır.

Anahtar Sözcükler: Ti-6Al-4V, Karbon Nanotüp, Çökelme Sertleşmesi, Ekranlama Etkinliği, Yansıma Kaybı.

ABSTRACT

EFFECT OF PRECIPITATION HARDENING ON CARBON NANOTUBE- REINFORCED Ti-6Al-4V MATRIX COMPOSITES PRODUCED BY POWDER METALLURGY METHOD

Berat YILMAZ

Department of Metallurgu and Materials Engineering

Graduate School of Alanya Alaaddin Keykubat University

January, 2026

In this study, the effects of precipitation hardening heat treatment on the mechanical and electromagnetic properties of Ti-6Al-4V matrix carbon nanotube (KNT) reinforced composite materials produced by powder metallurgy were investigated. Composites containing three different KNT ratios (1%, 3%, and 5%) were sintered at 1275 °C for varying durations. The precipitation hardening process consisted of solution treatment at 950 °C for 1 hour followed by water çözeltili alma, and yaşlandırma at 480 °C for 5 hours. Microhardness measurements revealed that the heat treatment increased the hardness of all specimens. After çözeltili alma, all samples exhibited significant hardness improvement; however, following yaşlandırma, a slight decrease was observed in low KNT content samples (1% and 3%), while the high KNT content sample (5%) continued to show hardness increase. Electromagnetic performance was evaluated through shielding effectiveness (SE) and reflection loss (RL) measurements in the 0–4.4 GHz frequency range. The results indicated a decrease in SE and RL values for all specimens after precipitation hardening. This decrease can be attributed to the reduction in sample thickness from 5 mm to 3.5 mm, changes in matrix/interface interactions, and microstructural alterations affecting KNT distribution during yaşlandırma. The findings demonstrate that while KNT reinforcement and precipitation hardening enhance mechanical properties of Ti-6Al-4V composites, the heat treatment may reduce their electromagnetic shielding and absorption performance. These results provide important insights for material design in defense, aerospace, and electromagnetic protection applications.

Keywords: Ti-6Al-4V, Carbon Nanotube, Precipitation Hardening, Shielding Effectiveness, Reflection Loss.

İÇİNDEKİLER

İÇ KAPAK SAYFASI	
ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ	i
TEŞEKKÜR SAYFASI	ii
ÖZET	iii
ABSTRACT	iv
İÇİNDEKİLER SAYFASI.....	v
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	vii
TABLolar LİSTESİ.....	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	x
1. GİRİŞ	1
1.1. Toz Metalurjisi.....	1
1.1.1. Tanımı ve temel ilkeleri.....	1
1.1.2. Toz üretimi ve yöntemleri	1
1.2.3. Şekillendirme yöntemleri	2
1.1.4. Sinterleme ve mikroyapı gelişimi.....	2
1.1.5. Toz metalurjisinin avantajları.....	2
1.1.6. Uygulama alanları	3
1.2. Titanyum Alaşımları ve Ti-6Al-4V	3
1.2.1. Genel özellikleri	5
1.2.2. Kimyasal bileşimi ve faz yapısı.....	5
1.2.3. Mekanik özellikleri.....	6
1.2.4. Korozyon ve oksidasyon direnci	6
1.2.5 Üretim ve işleme yöntemleri	6
1.2.6 Uygulama alanları	6
1.3. Karbon Nanotüp ve Takviye Malzemesi Olarak Kullanımı.....	7
1.3.1.Karbon nanotüplerin yapısı ve sınıflandırılması.....	7
1.3.2. Karbon nanotüplerin özgün özellikleri	7
1.3.3. Metal matrisli kompozitlerde karbon nanotüp kullanımı.....	8
1.3.4. Karbon nanotüplerin dağılımı ve arayüzey bağlanması	8
1.3.5. Titanyum ve Ti-6Al-4V matrisli kompozitlerde karbon nanotüp takviyesi	8
1.4. Çökeltme Sertleşmesi.....	9

1.4.1. Tanımı ve genel prensipleri	9
1.4.2. İşlem basamakları.....	9
1.4.3. Sertleşme mekanizması	10
1.4.4. Ti-6Al4V alaşımında çökelme sertleşmesi.....	10
1.4.5. Literatürde çökelme sertleşmesi uygulamaları	10
1.4.6. İşlem parametrelerinin önemi.....	11
1.5. Amaç ve Kapsam.....	11
2. LİTERATÜR.....	12
3. YÖNTEM.....	15
3.1. Malzemeler	15
3.2. Çökelme Sertleşmesi.....	17
3.3. Sertlik ve Ekranlama Etkinliği Testleri	17
4. BULGULAR	19
4.1. Çökelme Sertleşmesi Etkisi.....	31
4.2. KNT Takviyesi Etkisi	31
4.3. Sinterleme Süresinin Etkisi	31
4.4. Grafiksel İnceleme	31
4.5 Ekranlama ve Yansıma Kaybı Açısından Bulgular.....	32
5. TARTIŞMA, SONUÇ VE ÖNERİLER.....	33
5.1 Sonuç	33
5.2 Tartışma	34
5.3 Öneriler	35
6. KAYNAKLAR.....	37
7. ÖZGEÇMİŞ.....	40

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1 Toz Metalurjisi Üretim Şeması.....	1
Şekil 1.2.1 Titanyumun İki Ana Kristal Yapısı (Soldaki Alfa Fazı Hekzagonal Sıkı Paket, Sağdaki Beta Fazı Hacim Merkezli Kübik Yapı)	3
Şekil 1.2.2 Ti-6Al-4V Mikroyapılı Faz Diyagramı	4
Şekil 1.2.3 Ti-6Al-4V Faz Diyagramı	5
Şekil 3.1.1 Bakalite Alınmış Numuneler	15
Şekil 3.1.2 Protherm Marka PLF 130/9 Model Fırın.....	16
Şekil 3.1.3 Nabertherm Marka HT 40/17 Model Fırın	16
Şekil 3.1.4 Sertlik Ölçümü İçin Kullanılan Future-Tech Marka FM-ARS 7000 Model.....	16
Şekil 3.1.5 FM-700 Model	16
Şekil 3.1.6 Nanovna SV4401A 50khz-4400mhz Model Vektör Ağ Analizörü	16
Şekil 3.3 Sertlik Ölçüm Grafiği – Ti-Al-4V + KNT Kompozitleri (Vickers Sertliği)	18
Şekil 4.1.1 Numune 1 Çökelme Sertleşmesi İşlemi Öncesi.....	19
Şekil 4.1.2 Numune 1 Çözeltiye Alma İşlemi Sonrası	19
Şekil 4.1.3 Numune 1 Yaşlandırma İşlemi Sonrası	19
Şekil 4.2.1 Numune 2 Çökelme Sertleşmesi İşlemi Öncesi.....	20
Şekil 4.2.2 Numune 2 Çözeltiye Alma İşlemi Sonrası.....	20
Şekil 4.2.3 Numune 2 Yaşlandırma İşlemi Sonrası	20
Şekil 4.3.1 Numune 3 Çökelme Sertleşmesi İşlemi Öncesi.....	21
Şekil 4.3.2 Numune 3 Çözeltiye Alma İşlemi Sonrası	21
Şekil 4.3.3 Numune 3 Yaşlandırma İşlemi Sonrası	21
Şekil 4.4.1 %1 KNT İçeren Malzemenin İşlem Öncesi Ekranlama Etkinliği Grafiği	22
Şekil 4.4.2 %1 KNT İçeren Malzemenin İşlem Öncesi Yansıma Kaybı Grafiği	23
Şekil 4.4.3 %3 KNT İçeren Malzemenin İşlem Öncesi Ekranlama Etkinliği Grafiği	24
Şekil 4.4.4 %3 KNT İçeren Malzemenin İşlem Öncesi Yansıma Kaybı Grafiği	25
Şekil 4.4.5 %5 KNT İçeren Malzemenin İşlem Öncesi Ekranlama Etkinliği Grafiği	25

Şekil 4.4.6 %5 KNT İçeren Malzemenin İşlem Öncesi Yansıma Kaybı Grafiği	26
Şekil 4.5.1 %1 KNT İçeren Malzemenin İşlem Sonrası Ekranlama Etkinliği Grafiği.....	27
Şekil 4.5.2 %1 KNT İçeren Malzemenin İşlem Sonrası Yansıma Kaybı Grafiği.....	27
Şekil 4.5.3 %3 KNT İçeren Malzemenin İşlem Sonrası Ekranlama Etkinliği Grafiği.....	28
Şekil 4.5.4 %3 KNT İçeren Malzemenin İşlem Sonrası Yansıma Kaybı Grafiği.....	29
Şekil 4.5.5 %5 KNT İçeren Malzemenin İşlem Sonrası Ekranlama Etkinliği Grafiği.....	30
Şekil 4.5.6 %5 KNT İçeren Malzemenin İşlem Sonrası Yansıma Kaybı Grafiği.....	30



TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 1: Sertlik ölçüm tablosu – Ti-6Al-4V + KNT Kompozitleri (Vickers Sertliği, HV)...17



SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

Simgeler

α	Alfa fazı
β	Beta fazı
$^{\circ}\text{C}$	Santigrat derece

Kısaltmalar

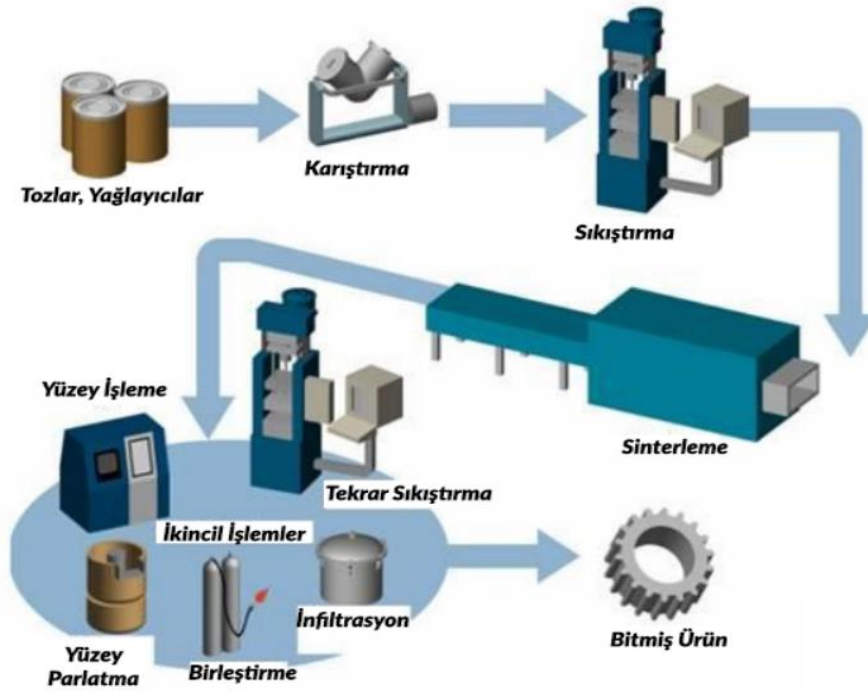
TM	Toz Metalurjisi
Ti64	Ti-6Al-4V
MMK	Metal Matrisli Kompozit
KNT	Karbon Nanotüp
SWKNT	Single Walled
MWKNT	Muti Walled
(LPBF)	Lazer Toz Yatak Ergitme
EMI - SE	Elektromanyetik Girişim Ekranlama Etkinliği

1.GİRİŞ

1.1.Toz Metalurjisi

1.1.1.Tanımı ve temel ilkeleri

Toz metalurjisi (TM), metalik tozların üretilmesi, şekillendirilmesi ve sinterlenmesi yoluyla çeşitli mühendislik parçalarının elde edildiği bir üretim teknolojisidir. Geleneksel döküm ve talaşlı imalata alternatif olarak geliştirilen bu yöntem, özellikle yüksek ergime sıcaklığına sahip, zor işlenebilir veya kompleks geometriye sahip bileşenlerin üretiminde önemli avantajlar sunmaktadır. Toz metalurjisi, malzeme israfını minimize eden, yüksek boyutsal hassasiyet sağlayan ve gelişmiş mikro yapı kontrolü sunan bir tekniktir. Ayrıca çok fazlı sistemlerin (kompozitler, dispersiyon sertleşmeli alaşımlar vb.) üretimine de olanak tanır.



Şekil 1.1 Toz metalurjisi üretim şeması^[1]

1.1.2. Toz üretim yöntemleri

Toz metalurjisinin ilk adımı olan toz üretimi, nihai ürünün özelliklerini doğrudan etkileyen kritik bir aşamadır. Toz üretim yöntemleri genel olarak şu başlıklar altında toplanabilir:

- Mekanik Yöntemler: Öğütme, atomizasyon (su, gaz, plazma)

- Kimyasal Yöntemler: Redüksiyon, elektroliz, çöktürme
- Fiziksel Yöntemler: Plazma atomizasyonu, vakum buharlaştırma

Her yöntem, elde edilen tozların morfolojisi, partikül boyutu dağılımı, saflığı ve akışkanlığı gibi özellikleri üzerinde farklı etkiler oluşturur. Örneğin, gaz atomizasyonu ile üretilen tozlar küresel yapıya sahipken, mekanik alaşımlama ile daha heterojen, yüksek enerjili tozlar elde edilebilir.

1.1.3. Şekillendirme yöntemleri

Tozlar üretildikten sonra, belirli bir geometrik form kazandırmak amacıyla çeşitli şekillendirme yöntemleri uygulanır. En yaygın şekillendirme yöntemleri şunlardır:

- Soğuk Presleme: Üniform yoğunluk sağlamak amacıyla tek eksenli veya izostatik presleme
- Sıcak Presleme: Aynı anda ısı ve basınç uygulanarak daha yüksek yoğunluk ve daha az porozite sağlanır
- Ekstrüzyon, Enjeksiyon Kalıplama ve 3D Baskı: Karmaşık şekilli parçaların üretiminde tercih edilen yöntemlerdir

Şekillendirme sonrası “yeşil parça” olarak adlandırılan yapı, genellikle yeterli mekanik dayanımı taşımaz. Bu nedenle bir sonraki adım olan sinterleme işlemi uygulanır.

1.1.4. Sinterleme ve mikroyapı gelişimi

Sinterleme, toz partiküllerinin yüksek sıcaklıkta difüzyon mekanizmalarıyla birbirleriyle bağlanmasını sağlayarak yoğun ve bütünlüklü bir yapı oluşturduğu işlemdir. Bu işlem tipik olarak katı hâl difüzyonu, tane sınırı hareketi ve gözenek giderimi ile ilerler. Sinterleme atmosferi (vakum, inert gaz, hidrojen gibi) ve süresi, mikro yapı ve mekanik özellikler üzerinde doğrudan etkilidir. Ayrıca sıcak izostatik presleme (HIP) gibi yardımcı işlemler de sinterleme sonrası uygulanarak porozitenin azaltılması ve mekanik özelliklerin iyileştirilmesi sağlanabilir.

1.1.5. Toz metalurjisinin avantajları

Toz metalurjisi, aşağıdaki avantajları nedeniyle ileri mühendislik uygulamalarında sıkça tercih edilen bir yöntemdir:

- Malzeme Verimliliği: Hurda oranı düşüktür, neredeyse net şekil üretim sağlar.
- Kompleks Geometriler: Geleneksel yöntemlerle üretilmeyecek şekiller elde

edilebilir

- Kontrollü Mikro yapı: Katı çözeltilerden çökelme sertleşmesine kadar çok sayıda faz kontrolü mümkündür.
- Özelleştirilebilir Bileşimler: Kompozit ve fonksiyonel gradyanlı malzemeler (FGM) üretimi mümkündür

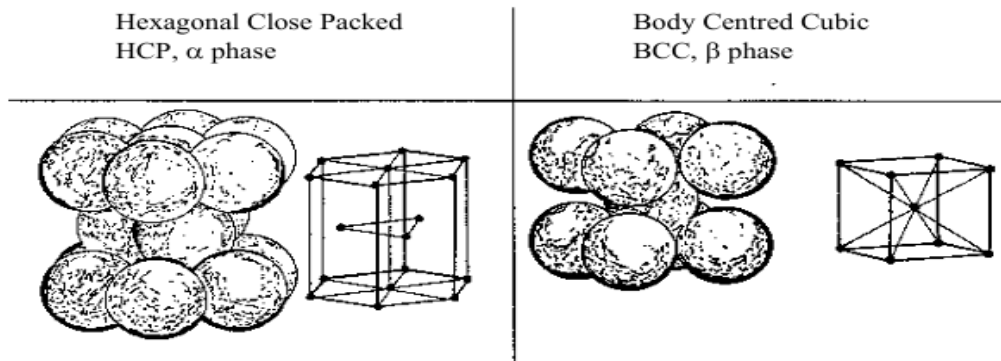
1.1.6. Uygulama alanları

Toz metalurjisi, aşağıdaki sektörlerde yaygın olarak kullanılmaktadır:

- Havacılık ve Uzay: Yüksek sıcaklık dayanımlı süper alaşımlar, hafif yapısal parçalar
- Otomotiv: Dişliler, eksantrik milleri, fren sistemleri
- Elektronik ve Enerji: Manyetik parçalar, piller, nükleer yakıt kapsülleri
- Biyomedikal: Gözenekli implantlar, kişiselleştirilmiş kemik yapıları
- Savunma ve Balistik: Zırh sistemleri, füze burun konileri, radar emici yapılar

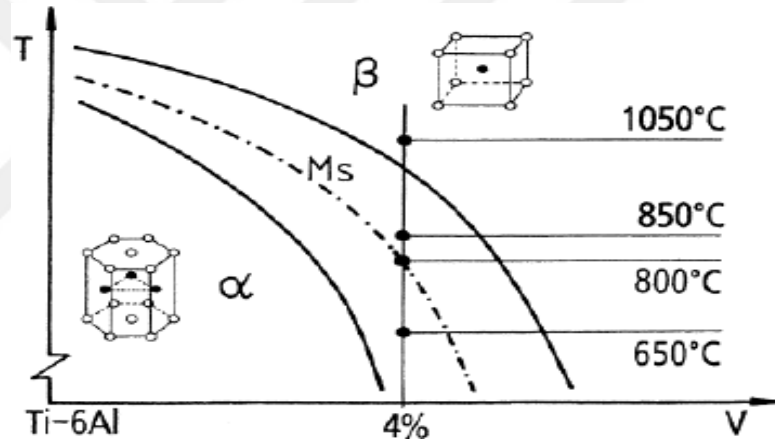
1.2. Titanyum Alaşımları ve Ti-6Al-4V

Titanyum ve titanyum alaşımları, yüksek mukavemet/ağırlık oranı, mükemmel korozyon direnci ve biyouyumluluk gibi özellikleri nedeniyle havacılık, savunma, otomotiv ve biyomedikal endüstrilerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle Ti-6Al-4V (Ti64), titanyum alaşımları içerisinde en çok tercih edilen malzemelerden biridir. Bununla birlikte, yüksek sıcaklık uygulamalarında ve aşınmaya maruz kalan bileşenlerde, mevcut mekanik özelliklerin daha da iyileştirilmesi gerekmektedir.

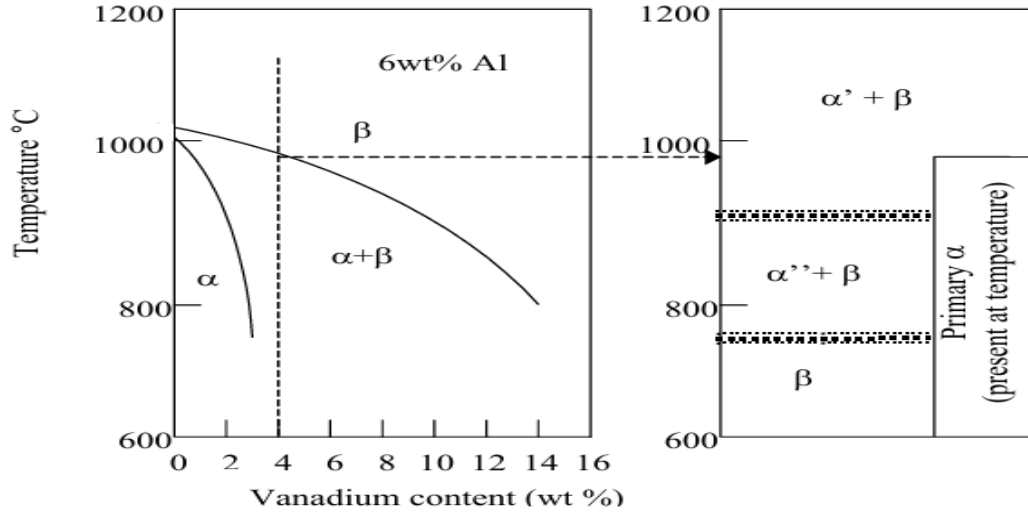


Şekil 1.2.1 Titanyumun iki ana kristal yapısı (soldaki alfa fazı hekzagonal sıkı paket, sağdaki beta fazı hacim merkezli kübik yapı).^[2]

Ti-6Al-4V alaşıımı, $\alpha + \beta$ tipi bir titanyum alaşıımı olup, mikro yapısında hem hekzagonal (α) hem de hacim merkezli kübik (β) fazları barındırır. Bu iki fazın oranı ve dağılımı, alaşıımın mekanik ve fiziksel özelliklerini doğrudan etkiler. Yüksek dayanımına rağmen aşınma direncinin ve yüksek sıcaklık mukavemetinin sınırlı olması, özellikle uçak motor parçaları, biyomedikal implantlar ve yüksek hızlı sürtünmeye maruz kalan bileşenlerde performans artışı ihtiyacını doğurmuştur. Bu bağlamda, alaşıımın mikro yapısını iyileştirmek ve mekanik özelliklerini geliştirmek amacıyla çökelme sertleşmesi, termomekanik işlemler ve partikül takviyesi gibi yöntemler uygulanmaktadır. Karbon nanotüpler gibi nano ölçekli takviye malzemeleri, üstün elastik modül, yüksek çekme dayanımı ve termal iletkenlik gibi özellikleri sayesinde Ti-6Al-4V matrisli kompozitlerin performansını artırma potansiyeli taşımaktadır. Özellikle toz metalurjisi yöntemiyle bu takviye elemanlarının homojen dağılımı sağlanabilmekte ve konvansiyonel yöntemlere kıyasla daha kontrollü mikro yapılar elde edilebilmektedir.



Şekil 1.2.2 Ti-6Al-4V Mikro yapı faz diyagramı[3]



Şekil 1.2.3 Ti-6Al-4V Faz diyagramı

1.2.1. Genel özellikleri

Ti-6Al-4V (Grade 5) alaşımı, titanyum elementine %6 oranında alüminyum (Al) ve %4 oranında vanadyum (V) elementlerinin ilavesiyle elde edilen, $\alpha+\beta$ faz yapısına sahip, en yaygın kullanılan titanyum alaşımlarından biridir. Alaşım, hafifliği, yüksek özgül dayanımı, korozyon direnci ve biyoyumluluğu ile havacılık, savunma sanayii, otomotiv, biyomedikal ve enerji sektörlerinde geniş bir kullanım alanına sahiptir. Yaklaşık 4.43 g/cm^3 yoğunluğuyla Ti-6Al-4V, çelik gibi geleneksel mühendislik malzemelerine kıyasla daha düşük yoğunlukta olup, benzer dayanım seviyelerini sağlayabilmektedir. Bu özelliği, yüksek dayanım/ağırlık oranı gerektiren uygulamalarda tercih edilmesini sağlamaktadır.

1.2.2. Kimyasal bileşimi ve faz yapısı

Ti-6Al-4V alaşımı, %6 Al (alfa kararlılaştırıcı) ve %4 V (beta kararlılaştırıcı) içerir. Alüminyum, Ti'nin α fazını kararlı hâle getirerek yüksek sıcaklık mukavemeti sağlar. Vanadyum ise β fazını kararlı hâle getirerek süneklik ve tokluk özelliklerini iyileştirir. Bu iki elementin kombinasyonu, hem mukavemet hem de şekillenebilirlik açısından optimize edilmiş bir mikroyapı sunar. Mikroyapısında, ısı işlem geçmişine bağlı olarak α , β ve α' fazları görülebilir. Bu çift fazlı yapı sayesinde Ti-6Al-4V, ısıtılma işlem, mekanik işleme ve yüzey modifikasyonlarına duyarlıdır. Bu da malzemenin çeşitli mühendislik gereksinimlerine göre özelleştirilmesine olanak tanır.

1.2.3. Mekanik özellikleri

Ti-6Al-4V, yaklaşık 900–1100 MPa arasında değişen çekme dayanımı ve 100–120 HV arasında değişen mikroyapısal sertlik değerleriyle yüksek dayanım sergiler. Ancak alaşımanın sünekliği, özellikle düşük sıcaklıklarda sınırlıdır. Isıl işlem ve alaşımanın mikroyapısı, bu özellikler üzerinde doğrudan etkilidir. Örneğin çökelme sertleşmesi, ince α' lamellerin oluşumunu teşvik ederek malzemenin sertliğini artırabilir. Bu alaşım aynı zamanda yüksek yorulma direnci, çatlak ilerlemesine karşı direnç ve iyi kaynaklanabilirlik özellikleriyle de dikkat çeker. Bu nedenlerle, kritik yapısal uygulamalarda tercih edilmektedir.

1.2.4. Korozyon ve oksidasyon direnci

Ti-6Al-4V, yüzeyinde doğal olarak oluşan ve yeniden kendini iyileştirebilen ince bir TiO_2 tabakası sayesinde, deniz suyuna, asidik ortamlara ve birçok kimyasal çözeltiliye karşı yüksek direnç gösterir. Bu özelliği, özellikle denizaltı teknolojileri, uzay aracı dış gövdeleri ve medikal implantlar gibi agresif ortamlarda kullanılmasını sağlar.

1.2.5. Üretim ve işleme yöntemleri

Ti-6Al-4V alaşımı, geleneksel döküm ve dövme işlemleriyle üretilebildiği gibi, toz metalurjisi, seçici lazer ergitme (SLM), elektron ışın ergitme (EBM) ve lazer metal biriktirme (LMD) gibi ileri üretim teknolojileriyle de işlenebilmektedir. Özellikle toz metalurjisi yöntemi, homojen mikro yapı, düşük segregasyon ve kompleks geometrilere olanak tanınması nedeniyle tercih edilmektedir. Toz metalurjisi ile üretilen Ti-6Al-4V parçalar, sinterleme, sıcak izostatik presleme (HIP) ve ısıl işlem gibi işlemlerle desteklenerek nihai özelliklerine ulaşmaktadır. Bu yöntem, aynı zamanda karbon nanotüp gibi ileri takviye malzemeleri ile kompozit üretimine de olanak sağlamaktadır.

1.2.6. Uygulama alanları

Ti-6Al-4V alaşımı, yüksek mukavemet ve düşük yoğunluk avantajı nedeniyle özellikle aşağıdaki alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır:

- Havacılık ve Uzay: Uçak gövdeleri, motor parçaları, iniş takımları, uzay aracı yapısal elemanları
- Savunma Sanayi: Zırh sistemleri, füze yapıları, insansız hava aracı (İHA) parçaları
- Biyomedikal: Kalça-diz protezleri, dental implantlar, vida-plak sistemleri

- Otomotiv: Motor supapları, egzoz sistemleri, yarış arabası şasi ve süspansiyonları
- Enerji: Kimyasal reaktörler, nükleer santral parçaları, ısı değıştiriciler

1.3.Karbon Nanotüp ve Takviye Malzemesi Olarak Kullanımı

1.3.1 Karbon nanotüplerin yapısı ve sınıflandırılması

Karbon nanotüpler (KNT'ler), grafen tabakasının silindirik bir tüp formuna kıvrılmasıyla oluşan nanoyapılardır. Bu yapılar, karbon atomlarının sp^2 hibritleşmesiyle oluşturdukları altıgen kafes örgüsünden meydana gelir. KNT'ler, yapısal olarak iki temel gruba ayrılır:

- Tek katmanlı karbon nanotüpler (Single-Walled KNT, SWKNT): Tek bir grafen tabakasının kıvrılmasıyla oluşur. Çapları genellikle 0.4–2 nm arasında değışir.
- Çok katmanlı karbon nanotüpler (Multi-Walled KNT, MWKNT): Birden fazla SWKNT'nin iç içe geçmiş silindirik yapılar oluşturmasıyla meydana gelir. Çapları 2–100 nm aralığında olabilir.

KNT'ler, hem boylamasına hem de çap ekseninde yüksek oranda yönlenme özelliğine sahiptir. Bu yapısal düzen, onların mekanik ve elektriksel özelliklerini büyük ölçüde iyileştirmektedir.

1.3.2 Karbon nanotüplerin özgün özellikleri

Karbon nanotüplerin mühendislikte takviye malzemesi olarak kullanılabilmesini sağlayan başlıca özellikler şunlardır:

- Yüksek elastik modül ve çekme dayanımı: SWKNT'lerin teorik çekme dayanımı ~100 GPa, elastik modülü ise ~1 TPa düzeyindedir.
- Düşük yoğunluk: Yaklaşık 1.3–1.4 g/cm³ yoğunluklarıyla, malzemeye ek yük getirmeden güçlendirme sağlarlar.
- Yüksek elektriksel iletkenlik: Metallerle karşılaştırılabilir düzeyde iletkenliğe sahiptir.
- Mükemmel ısı iletkenliği: ~3000–6000 W/m·K düzeyinde ısı iletimi ile ısı yönetim açısından katkı sağlar.

Bu özellikler, KNT'leri yalnızca mekanik takviye değil, aynı zamanda elektromanyetik ekranlama (EMI shielding), sensör uygulamaları ve termal yönetim sistemleri için de uygun kılmaktadır.

1.3.3 Metal matrisli kompozitlerde karbon nanotüp kullanımı

Karbon nanotüpler, metal matrisli kompozit sistemlerde takviye elemanı olarak giderek yaygınlaşmaktadır. Özellikle alüminyum, magnezyum, bakır ve titanyum gibi hafif metallerle birleştirildiklerinde aşağıdaki avantajlar sağlanmaktadır:

- Matrisin çekme mukavemetinde ve sertliğinde önemli artış
- Yorulma dayanımında iyileşme
- Aşınma direncinde artış
- Isıl genleşme katsayısında düşüş

Bu avantajlar, KNT'lerin matris fazı içinde homojen dağılımı ve ara yüzey etkileşiminin kalitesine doğrudan bağlıdır. Bu bağlamda, üretim yöntemleri büyük önem arz eder.

1.3.4 Karbon nanotüplerin dağılımı ve arayüzey bağlanması

KNT'lerin metal matris içinde etkin şekilde dağılması ve güçlü bir ara yüzey bağı oluşturması, kompozitin nihai mekanik ve fiziksel özelliklerini belirler. Dağılma sorunları, KNT'lerin yüksek yüzey enerjisi ve kümeleşme eğilimi nedeniyle yaygındır. Bu problemi aşmak amacıyla aşağıdaki teknikler yaygın olarak kullanılmaktadır:

- Ultrasonik dispersiyon
- Yüzey fonksiyonelleştirme (asitletme, plazma işlemi vs.)
- Yüksek enerjili mekanik alaşımlama
- Ball milling (bilyalı öğütme)
- Islak karıştırma ve çözücü temelli teknikler

Bu yöntemler sayesinde KNT'ler, matris boyunca daha homojen dağılmakta ve yük transfer mekanizması etkin biçimde çalışabilmektedir.

1.3.5 Titanyum ve Ti-6Al-4V matrisli kompozitlerde karbon nanotüp takviyesi

Ti-6Al-4V, havacılık ve biyomedikal alanlarda yaygın olarak kullanılan, yüksek mukavemete ve iyi korozyon direncine sahip bir titanyum alaşımdır. Bu alaşımın karbon nanotüplerle takviye edilmesi, hem hafiflik hem de yüksek performans gerektiren uygulamalarda önemli kazanımlar sağlar:

- Sertlik artışı: KNT'ler dislokasyon hareketini engelleyerek sertlikte artış sağlar.

- Isıl kararlılık: KNT'ler, sıcaklık altında yapının bozulmasını azaltır.
- Elektromanyetik ekranlama kabiliyeti: KNT'lerin iletken yapısı, EMI ekranlama performansını yükseltir.

Bu bağlamda, Ti-6Al-4V matrisli KNT takviyeli kompozitler; savunma sanayi, havacılık, uzay teknolojileri, ısı yönetimi sistemleri ve elektronik muhafazalar gibi ileri mühendislik alanlarında geniş bir uygulama potansiyeline sahiptir.

1.4.Çökelme Sertleşmesi

1.4.1. Tanımı ve genel prensipleri

Çökelme sertleşmesi (precipitation hardening veya age hardening), özellikle alüminyum, titanyum, nikel ve bazı paslanmaz çelik alaşımlarında uygulanan, mikroyapıda ikinci faz çökeltiler oluşturarak malzemenin mekanik özelliklerini iyileştirmeyi amaçlayan bir ısıtım işlemi yöntemidir. Bu yöntem sayesinde, düşük yoğunluklu ve iyi şekillendirilebilir alaşımlar yüksek mukavemet değerlerine ulaştırılabilir. Çökelme sertleşmesi üç temel adımdan oluşur:

1. Çözeltileme
2. Su verme
3. Yaşlandırma

Bu işlemler, alaşımların içinde homojen çözeltiden istenilen özelliklerde mikroskobik çökeltilerin kontrollü biçimde oluşturulmasını sağlar.

1.4.2. İşlem Basamakları

Çözeltileme işlemi: Bu işlemde alaşım, çözünebilen fazların katı çözelti hâlinde homojen olarak dağıldığı sıcaklık aralığında ısıtılır. Bu aşamada özellikle takviye edici elementlerin ana matris içinde tam çözünmesi hedeflenir. Örneğin Ti-6Al-4V alaşımında bu işlem 900–950 °C arasında gerçekleştirilir.

Su Verme (Ani Soğutma): Çözeltileme sonrası malzeme hızla su, yağ veya inert gaz ile soğutularak metastabil bir yapı elde edilir. Bu aşamada ikinci fazların çökmesi engellenir ve alaşım oda sıcaklığında doymuş katı çözelti formunu korur. Bu yapı, çökeltilerin kontrollü şekilde oluşturulacağı yaşlandırma işlemi için uygun bir zemin hazırlar.

Yaşlandırma (Yaşlandırma): Malzeme, kontrollü bir sıcaklıkta ve sürede tutulur. Bu süreçte, difüzyon yoluyla matris fazı içinde ince ve dağınık çökeltiler oluşur. Oluşan bu çökeltiler, dislokasyon hareketlerini engelleyerek mukavemet ve sertlik artışına neden olur.

Yaşlandırma işlemi doğal yaşlandırma (oda sıcaklığında) veya yapay yaşlandırma (200–600 °C gibi daha yüksek sıcaklıklarda) olarak uygulanabilir.

1.4.3. Sertleşme mekanizması

Çökelti, matris içinde farklı kristal yapısına ve kafes parametrelerine sahip oldukları için dislokasyonların hareketini zorlaştırır. Bu etki, çökelti kesme mekanizması veya çökelti üzerinden atlama mekanizması (Orowan mekanizması) ile gerçekleşir. Bu sayede:

- Akma dayanımı ($\sigma_{0.2}$),
- Sertlik (HV veya HR),
- Yorulma direnci ve
- Aşınma direnci

gibi özelliklerde önemli artışlar gözlemlenir.

1.4.4. Ti-6Al-4V alaşımında çökelme sertleşmesi

Ti-6Al-4V alaşımı, hem α (hegzagonal) hem de β (BCC) fazları içeren bir $\alpha+\beta$ titanyum alaşımıdır. Bu alaşımda çökelme sertleşmesi işlemi, genellikle β fazı içindeki elementlerin (örneğin V) kontrollü difüzyonuna ve α -faz çökeltilerinin oluşumuna dayalıdır. Uygulanan çözeltileme ve yaşlandırma parametreleri (sıcaklık-süre) malzemenin mikro yapısını belirleyerek:

- Faz oranlarını değiştirir
- Dislokasyon yoğunluğunu etkiler
- Gözeneklilik ve tane büyüklüğünü sınırlar

Bunun sonucunda özellikle kompozit formdaki Ti-6Al-4V–KNT sistemlerinde hem sertlik artışı hem de mikro yapısal stabilizasyon sağlanabilir.

1.4.5. Literatürde çökelme sertleşmesi uygulamaları

Çökelme sertleşmesi, literatürde farklı alaşımlarda başarıyla uygulanmış bir yöntemdir. KNT, SiC, Al_2O_3 gibi takviye fazlarla birlikte kullanıldığında, çökelme ile birlikte elde edilen mekanik özellik artışı daha da belirginleşmektedir. Bunun nedeni, çökelti ile takviye fazlar arasında sinerjik bir direnç oluşturulmasıdır. KNT takviyeli Ti-6Al-4V sistemlerinde yapılan çalışmalarda yaşlandırma sonrası mikroyapıda homojen çökelti gözlenmiş ve sertlikte %20–40'a kadar artış raporlanmıştır [4,5].

1.4.6. İşlem parametrelerinin önemi

Çökelme sertleşmesi işlemi sırasında;

- Sıcaklık
- Süre
- Soğutma hızı
- Yaşlandırma ortamı

gibi parametrelerin doğru seçimi oldukça kritiktir. Uygun olmayan koşullar, istenmeyen kaba çökeltilerin oluşmasına, gevrek fazlara veya sertlikte düşüşe neden olabilir. Bu sebeple her alaşım sistemi için optimize edilmiş bir çökelme programı oluşturulmalıdır.

1.5.Amaç ve kapsam

Bu tez çalışmasının temel amacı, toz metalurjisi yöntemiyle üretilen karbon nanotüp (KNT) takviyeli Ti-6Al-4V matrisli kompozit malzemelerde çökelme sertleşmesi uygulayarak sertlik ve elektromanyetik değerlerindeki değişimlerin incelenmesidir. Bu kapsamda, uygulanan ısıtma işleminin (çökelme sertleşmesi) katkısı sistematik olarak araştırılmıştır. Çalışmada öncelikle Ti-6Al-4V alaşım tozu ve belirli oranlarda eklenen KNT'ler, mekanik alaşımlama yöntemiyle homojen şekilde karıştırılmış ve ardından soğuk presleme ile şekillendirilmiştir. Şekillendirme sonrası numuneler vakum ortamında sinterlenmiş ve belirli parametrelerde yaşlandırma ısıtma işlemi uygulanmıştır. Üretilen numunelerin mekanik performansları sertlik testi ile değerlendirilmiştir. Bu tez kapsamında gerçekleştirilen çalışmaların, Ti-6Al-4V alaşımının mekanik ve elektromanyetik özelliklerinin iyileştirilmesinde çökelme sertleşmesi ile karbon nanotüp takviyesinin birlikte kullanımı üzerine literatürdeki bilgi birikimine katkı sağlaması ve ileri mühendislik uygulamaları için yüksek performanslı, hafif ve dayanıklı kompozit malzeme tasarımına yol göstermesi hedeflenmektedir.

2. LİTERATÜR

Titanyum alaşımları, özellikle Ti-6Al-4V, yüksek özgül dayanım, korozyon direnci ve biyouyumluluk gibi özellikleri sayesinde havacılık, biyomedikal ve savunma sanayi gibi yüksek performans gerektiren alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır [6]. Ancak, bu alaşımın aşınma direncinin sınırlı olması ve yüksek sıcaklık performansının artırılma gerekliliği, malzemenin geliştirilmesine yönelik çalışmaları hızlandırmıştır.

Toz metalurjisi (TM), Ti-6Al-4V gibi işlenmesi zor alaşımların üretiminde, mikroyapının daha homojen kontrol edilmesini sağlayan etkili bir yöntemdir [7]. Literatürde, TM yöntemi ile üretilen titanyum alaşımlarında, sinterleme sıcaklığı, presleme basıncı ve toz boyutunun mikroyapı ve mekanik özellikler üzerindeki etkisi detaylı şekilde araştırılmıştır [8]. Bu yöntem aynı zamanda, matris içine seramik veya karbon bazlı takviye malzemeleri entegre etmek için uygun bir temel sunmaktadır.

Karbon nanotüplerin (KNT), özellikle metal matrisli kompozitlerde takviye elemanı olarak kullanımı, son yıllarda geniş çapta araştırma konusu olmuştur. KNT'ler, yüksek elastik modül (~1 TPa), düşük yoğunluk ve yüksek çekme mukavemeti (~100 GPa) gibi özellikleri sayesinde, metal matrisli kompozitlerin sertlik ve mukavemet gibi mekanik özelliklerini önemli ölçüde artırabilmektedir [9,10]. Ancak KNT'lerin matris içinde homojen olarak dağılması ve matrisle güçlü bir arayüzey bağının sağlanması, performans üzerindeki en belirleyici faktörlerdendir. Bu nedenle, ultrasonik karıştırma, mekanik alaşımlama gibi teknikler sıklıkla kullanılmaktadır [11].

Çökelme sertleşmesi, metalik alaşımlarda dislokasyon hareketini sınırlandırarak mekanik dayanımı artırmak için yaygın olarak kullanılan bir ısıl işlem tekniğidir. Literatürde, Ti-6Al-4V alaşımına uygulanan yaşlandırma işlemlerinin, α ve β fazlarının oranını ve dağılımını değiştirdiği; bu sayede akma dayanımı ve sertlikte artış sağladığı gösterilmiştir [12]. Ayrıca, bazı çalışmalarda çökelme sertleşmesi ile KNT'lerin birlikte kullanımı sonucu, matris-takviye arayüzeyinde mikro çökeltilerin oluştuğu ve bu durumun kompozitin mekanik performansını olumlu etkilediği rapor edilmiştir [13].

Belirli oranlarda KNT içeren Ti-6Al-4V kompozitler toz metalurjisiyle üretilmiş ve ardından aşınma testlerine tabi tutulmuştur. Farklı KNT oranlarının (örneğin %1, %2) aşınma dayanımı üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. KNT oranının arttıkça aşınma direncinde önemli iyileşmeler sağlandığı gösterilmiştir. KNT miktarının belirlenmesine ışık tutabilir. Ayrıca toz metalurjisiyle üretimin performansa katkısını da destekler [14].

Toz metalurjisiyle Ti-6Al-4V ve TiAl bazlı kompozitler üretilmiş, ardından yüksek

sıcaklık testlerine tabi tutulmuştur. Farklı sinterleme sıcaklıkları, yoğunluk, mikro yapı ve yüksek sıcaklık mekanik dayanım ilişkisi incelenmiştir. Sinterleme parametrelerinin mekanik özelliklere etkisi detaylı olarak sunulmuş. çökelme öncesi/sırası sıcaklıklarının etkisini yorumlamak için kullanışlıdır. Ayrıca Ti-6Al-4V temelli kompozitlerin yüksek sıcaklık davranışı hakkında veri sağlar [15].

KNT'ler elektroerozyon işlemi (EDM) sırasında dielektrik sıvıya katılarak Ti-6Al-4V yüzeyine modifikasyon yapılmıştır. Elde edilen yüzeylerde korozyon ve aşınma direncinde önemli iyileşmeler sağlanmıştır. Her ne kadar üretim yöntemi farklı olsa da, KNT'lerin titanyum yüzey performansını artırmadaki potansiyelini doğrular. Yüzey/matris etkileşimi ve dayanım artışı üzerine çıkarım yapılabilir [16].

KNT'lerin Ti matrisinde kısmen reaksiyona girerek in-situ TiC fazları oluşturduğu gösterilmiştir. Mikroyapı, XRD ve SEM analizleri ile detaylı şekilde incelenmiş, takviye mekanizmaları (yük transferi, dislokasyon engelleme, çökelti sertleşmesi) açıklanmıştır. Olası KNT-Ti etkileşimleri ve mikroyapısal değişimler bu makaleden faydalanarak yorumlanabilir. Ayrıca çökelme sertleşmesi ile sinerjik etki olup olmadığı üzerine literatür destek sağlar [17].

Ti-6Al-4V matrisli kompozit malzemeler, karbon nanotüp (KNT) takviyesiyle güçlendirilmiş ve lazer toz yatak ergitme (LPBF) yöntemiyle üretilmiştir. Grafen ve KNT katkılarının yüksek sıcaklıklarda in-situ TiC fazına dönüştüğü görülmüş; bu fazın, α' martensit yapı içinde homojen dağılmasıyla birlikte tane incelmeleri sağlanması sayesinde, kompozitin hem mikrosertlik hem de çekme dayanımında anlamlı artışlar gözlemlenmiştir. 400–600 °C aralığında yapılan yüksek sıcaklık testleri sonucunda, saf Ti-6Al-4V alaşımı ile karşılaştırıldığında kompozit numunelerde 126–162 MPa arası çekme dayanımı artışı sağlanmıştır. Ayrıca, çökelme öncesi ve sırasındaki sıcaklıkların mikroyapı dönüşümünü nasıl etkilediği konusunda da veri sunarak, özellikle çökelme sertleşmesi veya ısıtma işlem sonrası davranışın yorumlanmasında kullanılabilecek niteliktedir [18].

Toz metalurjisi ile üretilen Ti-6Al-4V ve TiAl bazlı kompozitlerin sinterleme sıcaklığı, mikroyapının gelişimi ve dolayısıyla mekanik performansı üzerinde belirleyici rol oynamaktadır. Düşük sıcaklıklarda (≤ 1100 °C) tam yoğunluk sağlanamamakta ve gözenekli yapı nedeniyle mekanik özellikler sınırlı kalmaktadır. Buna karşılık, yüksek sıcaklıklarda (≥ 1300 °C) gerçekleşen sinterleme işlemleri ile birlikte tane büyümesi ve faz dönüşümleri artmakta, bu da çekme dayanımı, sertlik ve kırılma tokluğu gibi parametreleri doğrudan etkilemektedir. Ayrıca, yüksek sıcaklıklarda difüzyon

mekanizmaları aktive olduğundan, partikül bağlanması artar ve arayüzeydeki oksit fazların çözünmesi kolaylaşır. Bu bağlamda sinterleme sıcaklığı, mikro yapı–yoğunluk–mekanik özellik üçgeninin hassas dengesini belirleyen temel parametrelerden biridir [19,20]. Karbon nanotüpler (KNT), yüksek elektriksel iletkenlik ($\sim 10^6$ S/m) ve geniş yüzey alanı sayesinde elektromanyetik (EM) dalga soğurma ve ekranlama uygulamalarında etkili bir takviye elemanıdır. Özellikle metal matrisli kompozitlerde (MMK'ler), KNT'lerin dağılımı ve arayüzey etkileşimleri, yansıma kaybı (RL) ve ekranlama etkinliği (SE) performansını doğrudan etkiler [21].

Literatürde Ti-6Al-4V/KNT kompozitlerde %1.5 KNT takviyesinin X-bandında (8-12 GHz) -32 dB RL sağladığını ve KNT'lerin dipol polarizasyonunu artırarak soğurma mekanizmasını güçlendirdiğini raporlamıştır. [5]

Literatürde KNT'lerin SE performansını, iletkenlik kayıpları ve çoklu yansıma etkisiyle 0-6 GHz aralığında >60 dB'ye çıkarabildiğini göstermiştir. [22]

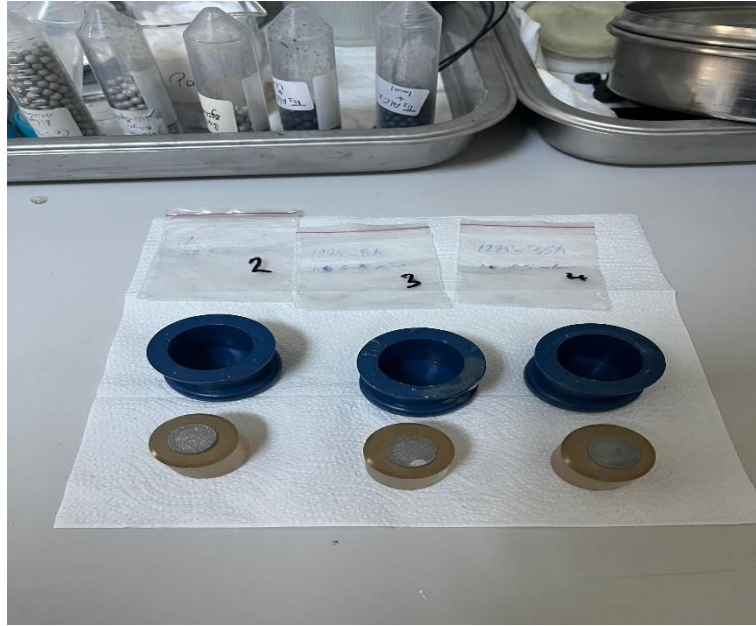
Literatürde çökelme sertleşmesi sonrası KNT'lerin iletkenliğinin azaldığını ve RL değerlerinin -40 dB'den -15 dB seviyelerine gerilediğini belirlemiştir.[23]

Literatürde düşük sıcaklıkta yaşlandırmanın (400-500°C), KNT/matris arayüzeyini koruyarak SE'yi 45 dB üzerinde tuttuğunu vurgulamıştır. [24]. Yukarıda belirtilen çalışmalar, her bir yöntemin (toz metalurjisi, KNT takviyesi, çökelme sertleşmesi) tek başına Ti-6Al-4V üzerinde etkili olduğunu göstermektedir. Ancak bu üç yaklaşımın birlikte kullanıldığı çalışmalar sınırlıdır. Bu nedenle bu tez çalışması, söz konusu yöntemleri bir araya getirerek, hem literatürdeki boşlukları doldurmayı hem de yeni nesil yüksek performanslı titanyum matrisli kompozitler geliştirmeyi amaçlamaktadır.

3.YÖNTEM

3.1.Malzemeler

Çalışmada kullanılan Ti-6Al-4V ve Karbon nanotüp tozları yerel tedarikçiden (nanografi) temin edilmiştir. Numuneler 1275 °C sıcaklıkta uniaxial 150 bar basınçta ve 1.2×10^{-5} mbar vakum ortamında üretilmiştir. Numunelerin çapı 14 mm, kalınlığı ise başlangıçta 5 mm olarak ölçüldü. Zımparaladıkça numune kalınlığı 3.5 mm'ye geriledi. Numunelere sırasıyla %1, %3 ve %5 oranıyla karbon nanotüp takviye edilmiştir. Numunelere sırasıyla 2.5 saat, 5 saat ve 7.5 saat sinter süresi uygulanmıştır. Numuneler elle tutulamayacak kadar küçük olduğu için soğuk bakalite alma işlemi yapılmıştır. Numunelerin yüzeyine zımparalama ve parlatma işlemleri yapıldı. Çökelme sertleşmesi işlemi öncesinde ve sonrasında numunelerin sertlik ve elektromanyetik girişim ekranlama etkinliği EMI-SE (elektromagnetic interference-shielding effectiveness) değeri ölçüldü. Ayrıca çözeltiye alma işleminden sonrada (yaşlandırma işleminden önce) sertlik değeri ölçülmüştür. Çökelme sertleşmesi işlemi için kullanılan fırınlar Protherm markasının PLF 130/9 modeli ve Nabertherm markasının HT 40/17 modelleridir. Sertlik testi için kullanılan cihazlar Future-Tech markasının Microhardness Tester FM-700 ve Full Automatic Microhardness Testing System FM-ARS 7000 modelleridir.



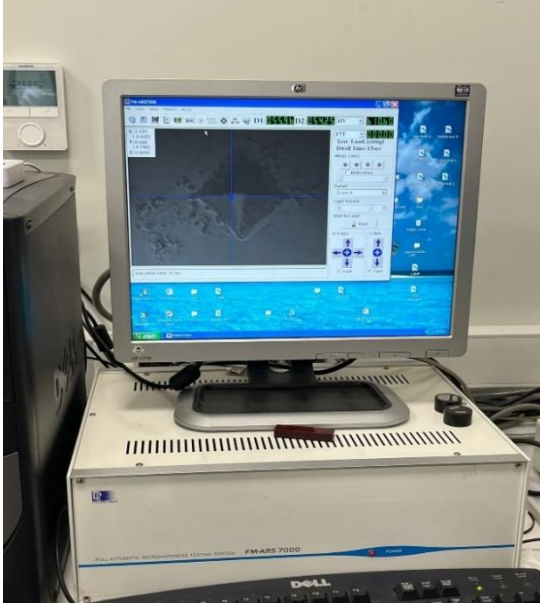
Şekil 3.1.1 : Bakalite alınmış numuneler



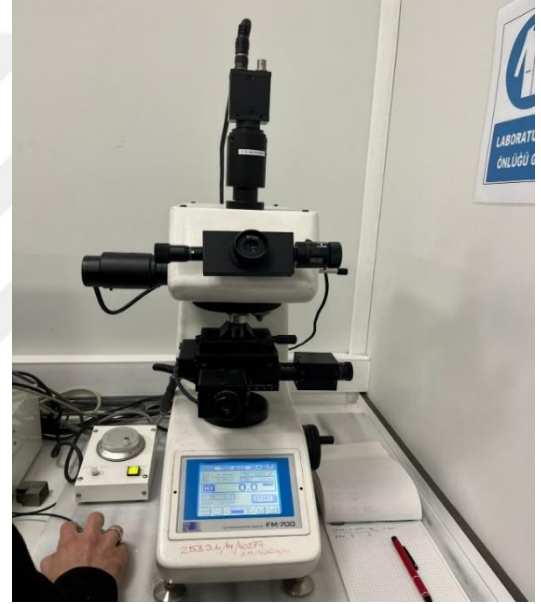
Şekil 3.1.2 Protherm marka PLF 130/9 model fırın



Şekil 3.1.3 Nabertherm marka HT 40/17 model fırın



Şekil 3.1.4 Sertlik ölçümü için kullanılan Future-Tech marka FM-ARS 7000 model



Şekil 3.1.5 FM-700 model



Şekil 3.1.6 NanoVNA SV4401A 50KHz-4400MHz model vektör ağ analizörü

3.2.Çökelme Sertleşmesi

Metallerin mukavemetini ve sertliğini arttırmak için uygulanan bir ısıtma işlemidir. Temel prensibi metal matris içinde ikinci faz çökeltilerinin oluşturulması ve bu çökeltilerin dislokasyon hareketini engelleyerek malzemenin dayanımının artırılmasıdır.

- Çözümleme

Alaşım yüksek sıcaklıkta (950 °C) 1 saat ısıtıldı ve katı çözelti haline getirildi.

Alaşımındaki tüm elementler tek bir fazda çözünüp homojen bir yapı elde edildi.

Ardından malzeme su içerisinde hızlı soğutularak çökelme için uygun yapı oluşturuldu (çözeltiye alma)

- Yaşlandırma

Soğutma sonrasında alaşım orta sıcaklıkta (480 °C) 5 saat ısıtıldı. Bu süre içerisinde katı çözelti içindeki elementler ayrışarak küçük çökeltilik fazlar oluşturur.

Bu çökeltilik fazlar dislokasyonların hareketini sınırlar ve malzemenin sertliğini artırır.

- Hassas Kontrollü Soğutma

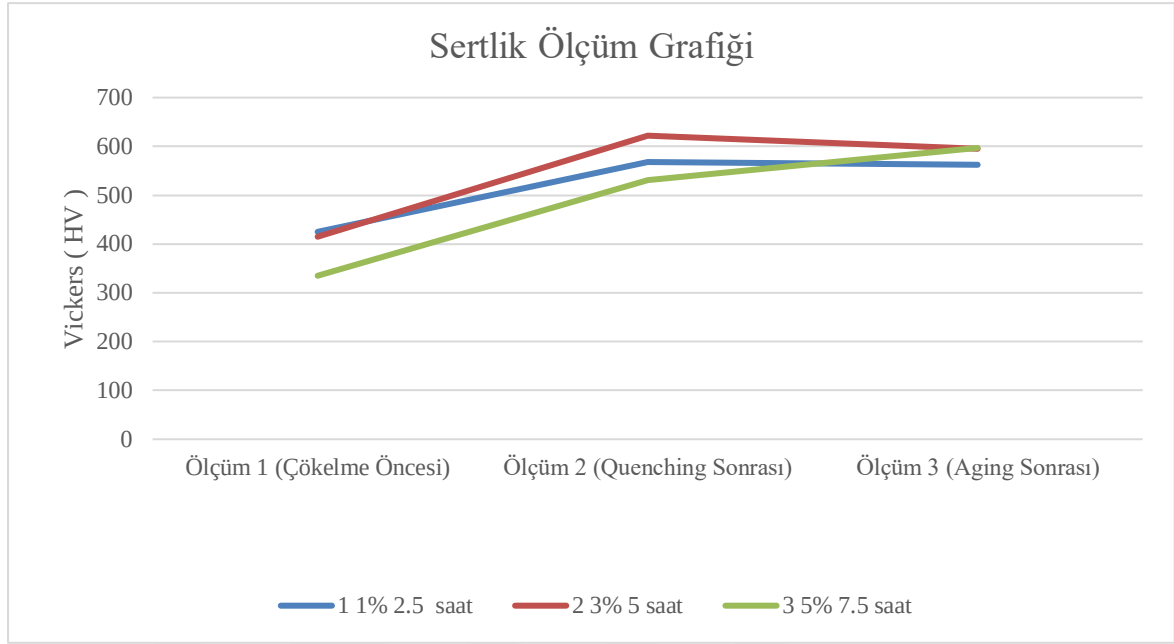
Yaşlandırma işleminden sonra malzeme kontrollü bir şekilde hedeflenen mikroyapısal faz dengesi için hava ortamında soğutuldu.

3.3.Sertlik ve Ekranlama Etkinliği Testleri

Tablo 3.3 : Sertlik ölçüm tablosu – Ti-6Al-4V + KNT Kompozitleri (Vickers Sertliği, HV)

Numune numarası	KNT içeriği (%)	Sinterleme Süresi (saat)	Ölçüm 1 (Çökelme öncesi)	Ölçüm 2 (Çözeltiye alma sonrası)	Ölçüm 3 (Yaşlandırma sonrası)
1	%1	2.5 saat	425 HV	568 HV	562 HV
2	%3	5 saat	415 HV	622 HV	595 HV
3	%5	7.5 saat	335 HV	531 HV	597 HV

Uygulanan çökelme sertleşmesi işlemi sonucunda kompozit yapıda belirgin bir sertlik artışı gözlenmiştir. Yaşlandırma öncesi çözeltiye alınmış örnekler düşük sertlik gösterirken, uygun



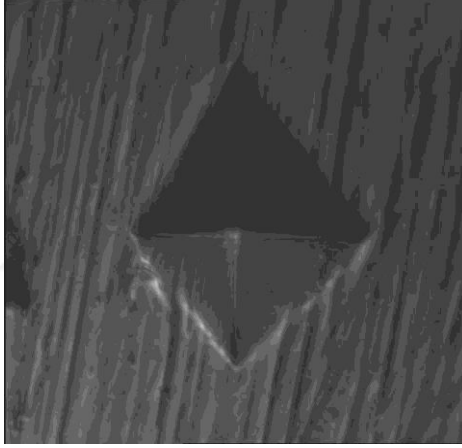
Şekil 3.3 Sertlik ölçüm grafiği – Ti-6Al-4V + KNT Kompozitleri (Vickers Sertliği, HV)

sıcaklık ve sürede yapılan yaşlandırma işlemiyle birlikte ikinci faz çökeltiler oluşmuş ve matris içerisindeki dislokasyon hareketleri engellenmiştir. Bu durum, sertlik değerlerinde yaklaşık %25–40 oranında bir artış sağlamıştır. Ayrıca karbon nanotüp (KNT) takviyesi sayesinde çökeltilerin daha homojen dağılması ve matrisle güçlü arayüz oluşması, sertlikteki artışı desteklemiştir. Sertlik testleri her ölçüm için 1000 gram yük ve 15 saniye ile gerçekleştirilmiştir.

4. BULGULAR

Bu çalışmada, toz metalurjisi metoduyla üretilen ve farklı oranlarda karbon nanotüp (KNT) (%1, %3 ve %5) takviyesi içeren Ti-6Al-4V matrisli kompozit numuneler üzerinde çökelme sertleşmesi işleminin (solution treatment + çözeltiye alma + yaşlandırma) sertlik ve elektromanyetik üzerine etkileri incelenmiştir. Her numune üç aşamada sertlik ölçümleri ve iki aşamada ekranlama etkinliği (SE) ve yansıma kaybı (RL) ölçümleri yapılmıştır: Sertlik ölçümleri çökelme sertleşmesi öncesi, çözeltiye alma sonrası ve yaşlandırma (yaşlandırma) sonrası. Elektromanyetik ölçümler ise ekranlama etkinliği (SE) ve yansıma kaybı (RL) çözeltiye alma işleminden önce ve yaşlandırma işleminden sonra ikişer kez yapılmıştır. Ayrıca, her numune farklı sinterleme süreleri (2.5 saat, 5 saat, 7.5 saat) uygulanarak üretilmiştir.

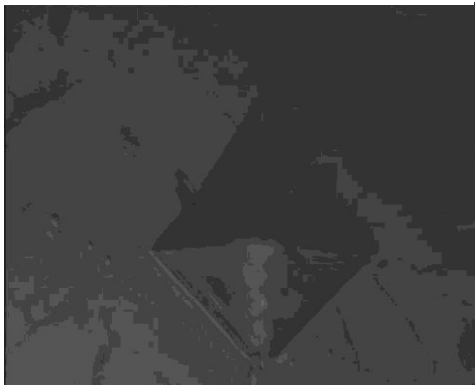
Sırasıyla numune 1'in mikrosertlik testi görüntüleri.



Şekil 4.1.1 Numune 1 çökelme sertleşmesi işlemi öncesi

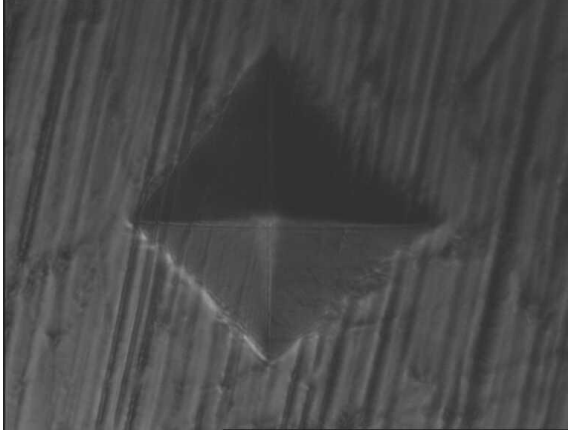


Şekil 4.1.2 Numune 1 çözeltiye alma işlemi sonrası



Şekil 4.1.3 Numune 1 yaşlandırma işlemi sonrası

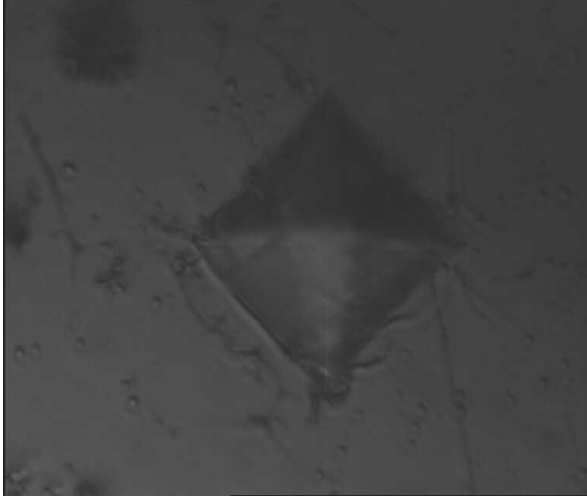
Sırasıyla numune 2'nin mikrosertlik testi görüntüleri.



Şekil 4.2.1 Çökelme sertleşmesi işlemi öncesi

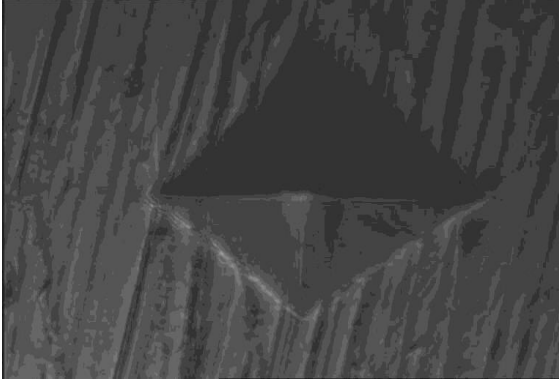


Şekil 4.2.2 Çözeltiye alma işlemi sonrası



Şekil 4.2.3 Yaşlandırma işlemi sonrası

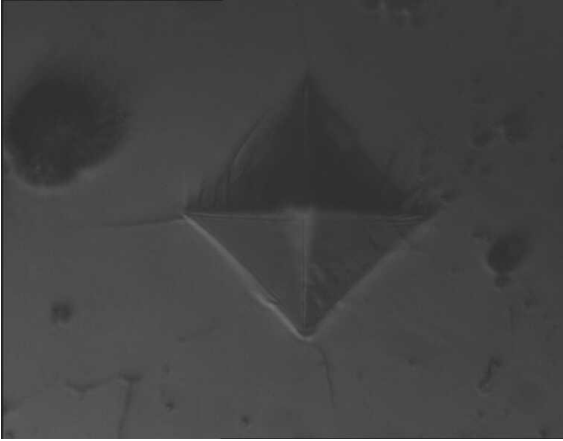
Sırasıyla numune 3'ün mikrosertlik testi görüntüleri



Şekil 4.3.1 Çökelme sertleşmesi işlemi öncesi



Şekil 4.3.2 Çözeltiye alma işlemi sonrası



Şekil 4.3.3 Yaşlandırma işlemi sonrası

% 1, 3, 5 KNT Tabanlı Malzemelerin Mikrodalga Ekranlama Etkinliği (SE) ve Yansıma Kaybı (RL) Performansları Ölçümü; KNT tabanlı malzemelerin mikrodalga ekranlama etkinliği ve yansıma kaybı performansları, 0- 4.4 GHz aralığında iki portlu vektör network analizörü (SV4401 A VNA) cihazı ile ölçülmüştür. Pelet halindeki numunlerin kalınlığı 3.5 mm ile 5 mm arasında değişmiştir.

0 – 4.4 GHz aralığı, UHF ve SHF bantlarının bir kısmını kapsar ve özellikle kablosuz haberleşme, cep telefonu şebekeleri ve radar sistemlerinde yoğun kullanılır. Ekranlama etkinliği (SE) yada araya girme kaybı terimi bir malzemeye gelen elektromanyetik dalganın bu malzemeden geçerek karşı tarafa ne kadarının geçtiği ile alakalıdır [25,26]. Malzemeye gelen elektromanyetik dalganın ne kadarının emildiği veya ne kadarının geri yansıtıldığı da ölçülebilmektedir. Örneğin bir ölçümde SE değeri -10 dB verdiğinde, gelen elektromanyetik dalganın % 90 oranında azaltıldığı ve % 10' unun karşıya geçtiğini kabul etmekteyiz [27,28] Kalkanlama etkisinin performans değeri, gelen elektromanyetik dalganın kompozit

malzemeden ne kadar geçtiğine bağlıdır. Malzemeye gelen elektromanyetik dalganın ne kadarının emildiği veya ne kadarının geri yansıdığı da bu cihazla ölçülebilir, ancak biz SE değeri ile malzemeye gelen elektromanyetik dalganın ne kadarının malzemeden geçtiğine bakıyoruz.

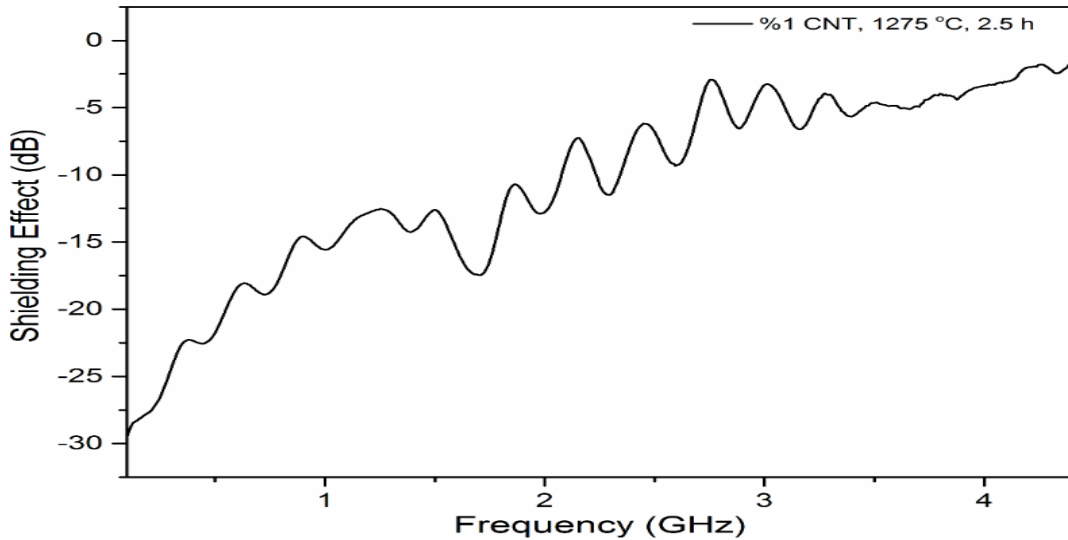
SE değerinin oldukça düşük değerler vermesi ile gelen elektromanyetik dalganın hem geri yansıma yaptığı hem yutulduğu veya sadece geri yansıdığını ya da malzemede yutulduğu anlaşılmaktadır, ancak tam değerler için ayrı ölçümler yapılması gerekmektedir . [26]

Elektromanyetik dalgalar bir yüzeye veya malzeme çarptığında, bir kısmı yansır, bir kısmı emilir, bir kısmı da malzemeden karşıya geçer. Yansıma kaybı (RL), gelen dalganın ne kadarının geri yansıdığını desibel (dB) cinsinden gösteren bir ölçüdür.

Gözlenen yansıma kaybı (RL) ve SE değerleri geometri ve yönelime bağlıdır. Genel olarak, en düşük yansıma kaybı, yansıma katsayısı minimum seviyeye ulaştığında elde edilir; bu, gelen elektromanyetik dalgaların hiçbirinin kompozit malzemeden geri yansımadığı anlamına gelir [25,26].

% 1 KNT Ekranlama Etkinliği Ölçümleri

Aşağıdaki şekilde 0-4.4 GHz frekans aralığında (% 1 KNT) malzemenin ekranlama etkinliği değerlerinin frekansa göre değiştiği gösterilmiştir. Numune kalınlıkları 5 mm'dir. SE (ekranlama etkisi) olarak adlandırılan ekranlama etkinliği ölçümleri, 2 portlu bir VNA ağ analizörü kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Hassasiyeti garanti altına almak için ölçümler, sabit 5 mm kalınlığında üretilmiş numuneler kullanılarak tekrar yapılmıştır.

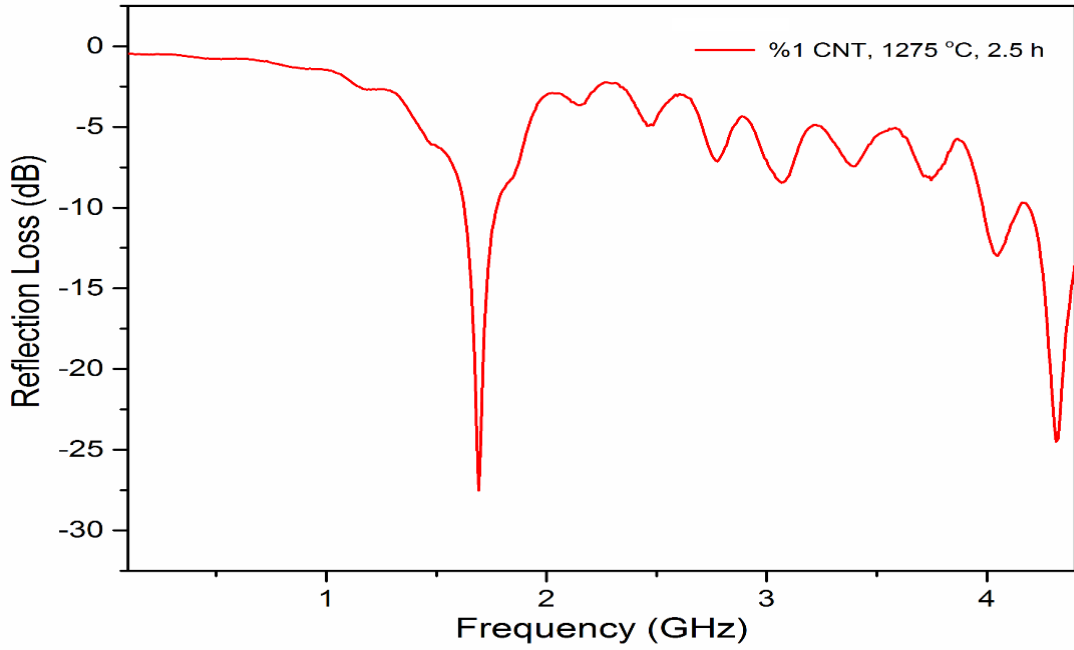


Şekil 4.4.1 %1 KNT içeren malzemenin işlem öncesi ekranlama etkinliği grafiği

Bu malzeme 0 ile 0.53 GHz aralığında -20 dB'nin altında ekranlama etkinliği (SE)

değeri vermiştir, ayrıca 0 ile 0.87 GHz frekans aralığında -15 dB'nin altında değer göstermiştir. Yine geniş frekans aralığı olarak 0-2.05 GHz frekans aralığında -10 dB'nin altında SE değeri vermiştir. Bu malzeme sırası ile 0.44, 0.72, 1.7, 1.98, 2.29 GHz frekans noktalarında -22.63, -19.05, -17.46, -12.97, -11.55 dB değerleri vermiştir.

% 1 KNT Yansıma Kaybı (RL) Ölçümleri Aşağıdaki şekilde 0-4.4 GHz frekans aralığında (% 1 KNT) malzemenin yansıma kaybı değerlerinin frekansa göre değiştiği gösterilmiştir.

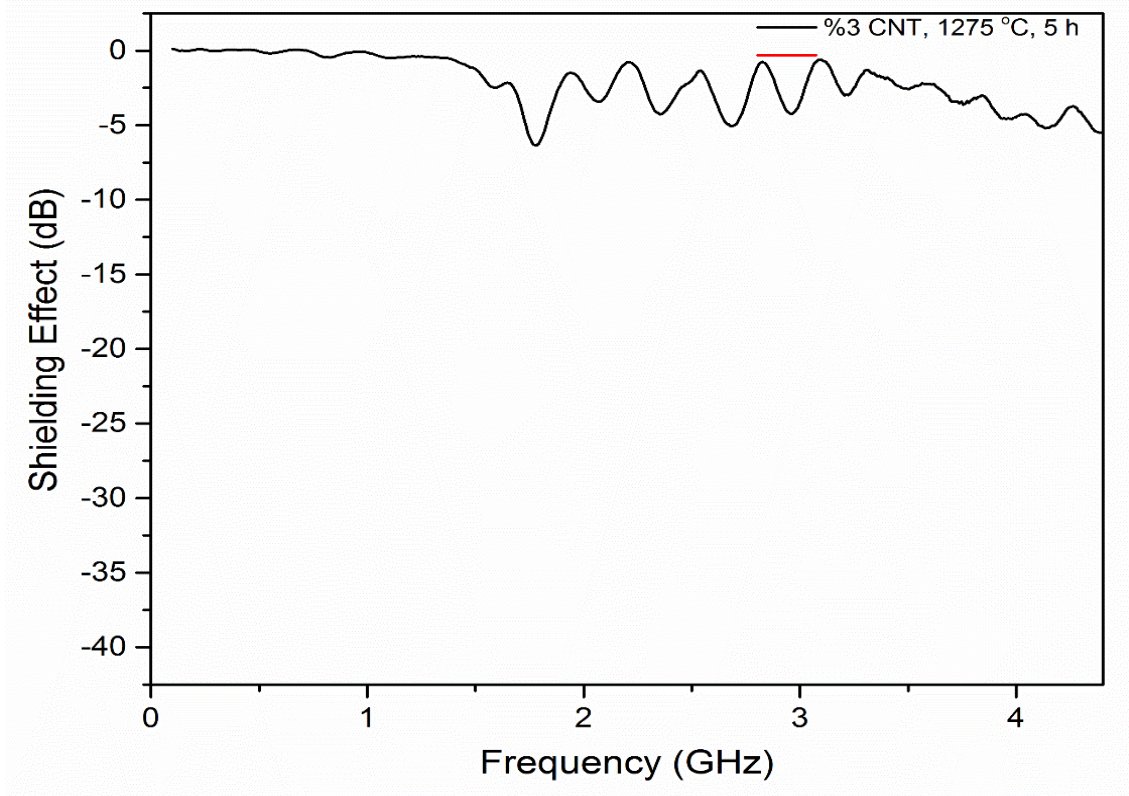


Şekil 4.4.2 %1 KNT içeren malzemenin işlem öncesi yansıma kaybı grafiği

Bu malzemenin yansıma kaybı değerleri belirli frekanslarda iyi değerler vermiştir.

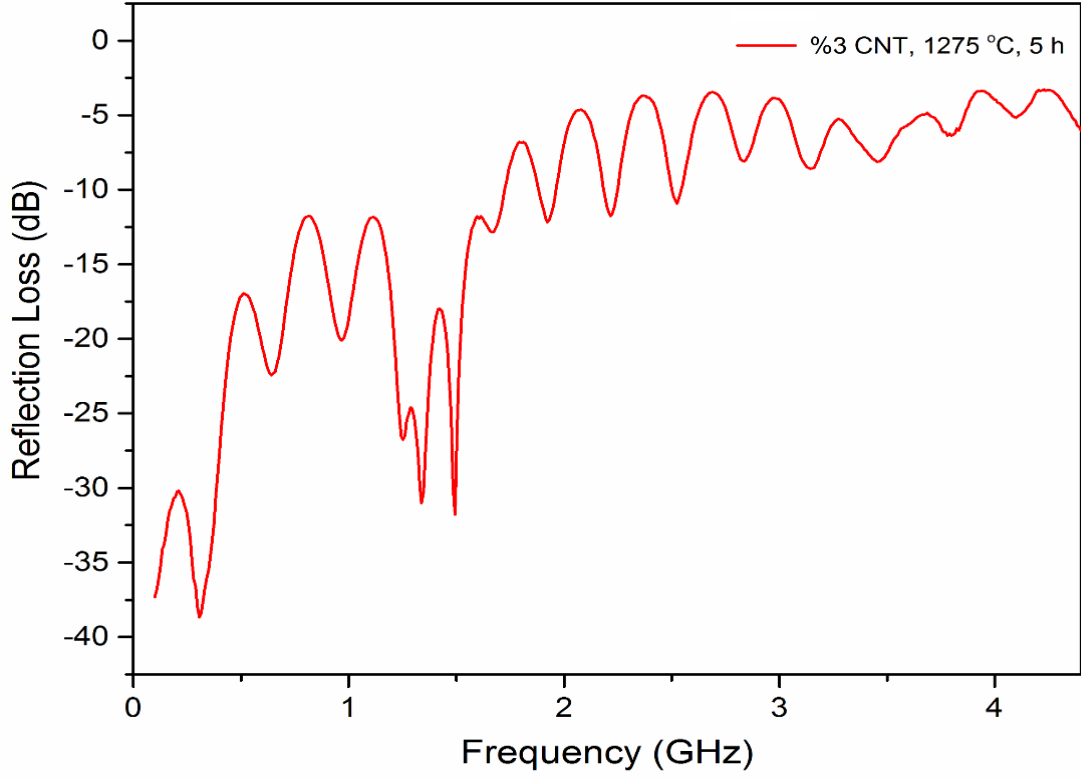
1.68 GHz frekans değerinde -27.62 dB değeri vermiştir, yine belirgin pik olarak 4.05 GHz frekans değerinde -13.06 dB yansıma kaybı değeri göstermiştir. Ayrıca 4.34 GHz frekans değerinde -24.63 dB yansıma kaybı değeri sergilemiştir.

% 3 KNT Ekranlama Etkinliği Ölçümleri, Aşağıdaki şekilde 0-4.4 GHz frekans aralığında (% 3 KNT,) malzemenin ekranlama etkinliği değerlerinin frekansa göre değiştiği gösterilmiştir. Bu malzeme istenilen -10 dB altında iyi değerler sergilememiştir.



Şekil 4.4.3 %3 KNT içeren malzemenin işlem öncesi ekranlama etkinliği grafiği

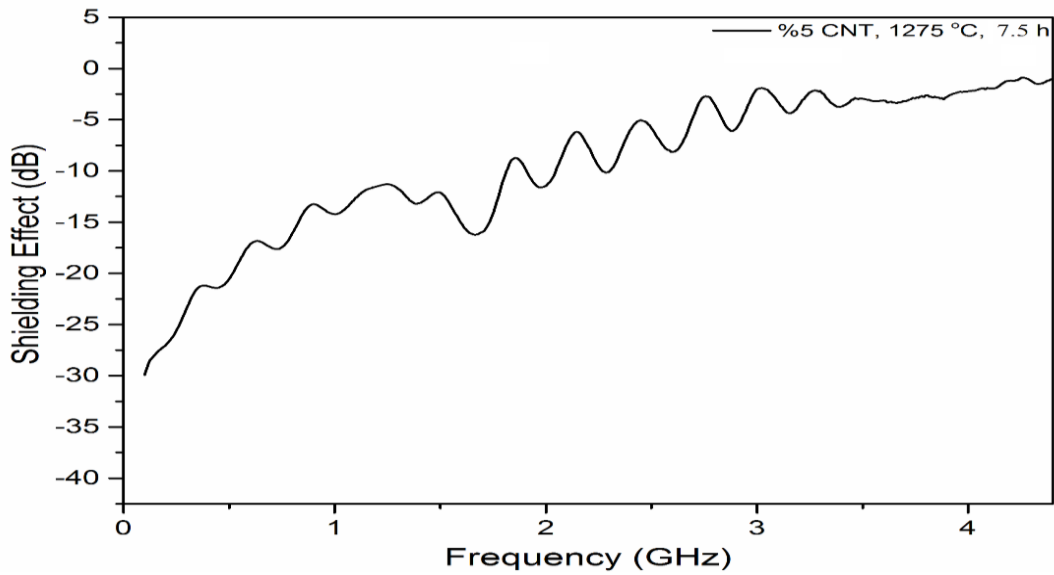
% 3 KNT Yansımaya Kaybı Ölçümleri, Aşağıdaki şekilde 0-4.4 GHz frekans aralığında (% 3 KNT,) malzemenin yansımaya kaybı değerlerinin frekansa göre değiştiği gösterilmiştir. Malzemeye gelen elektromanyetik dalganın malzemedan ne kadarının yansımaya kaybına ulaştığı bu cihazla ölçülmüştür. Bu malzeme 0 ile 0.37 GHz frekans aralığında -30 dB'nin altında yansımaya kaybı değeri vermiştir bu değer oldukça iyidir. Ayrıca 0 ile 0.42 GHz frekans bandına -20 dB'nin altında yansımaya kaybı değeri vermiştir. Yine 0 ile 0.72 GHz frekans aralığında -15 dB'nin altında yansımaya kaybı değeri vermiştir. Geniş frekans bandı olarak yine 0 ile 1.7 GHz aralığında -10 dB'nin altında yansımaya kaybı değeri vermiştir. Bu malzeme en düşük değer olarak 0.34 GHz frekansında -38.5 dB yansımaya kaybı değeri göstermiştir. Ayrıca 1.34 GHz frekansında -31.21 dB değer vermiştir, 1.49 GHz frekansında da -31.95 dB yansımaya kaybı değeri sergilemiştir.



Şekil 4.4.4 %3 KNT içeren malzemelerin işlem öncesi yansıma kaybı grafiği

% 5 KNT Ekranlama Etkinliği Ölçümleri.

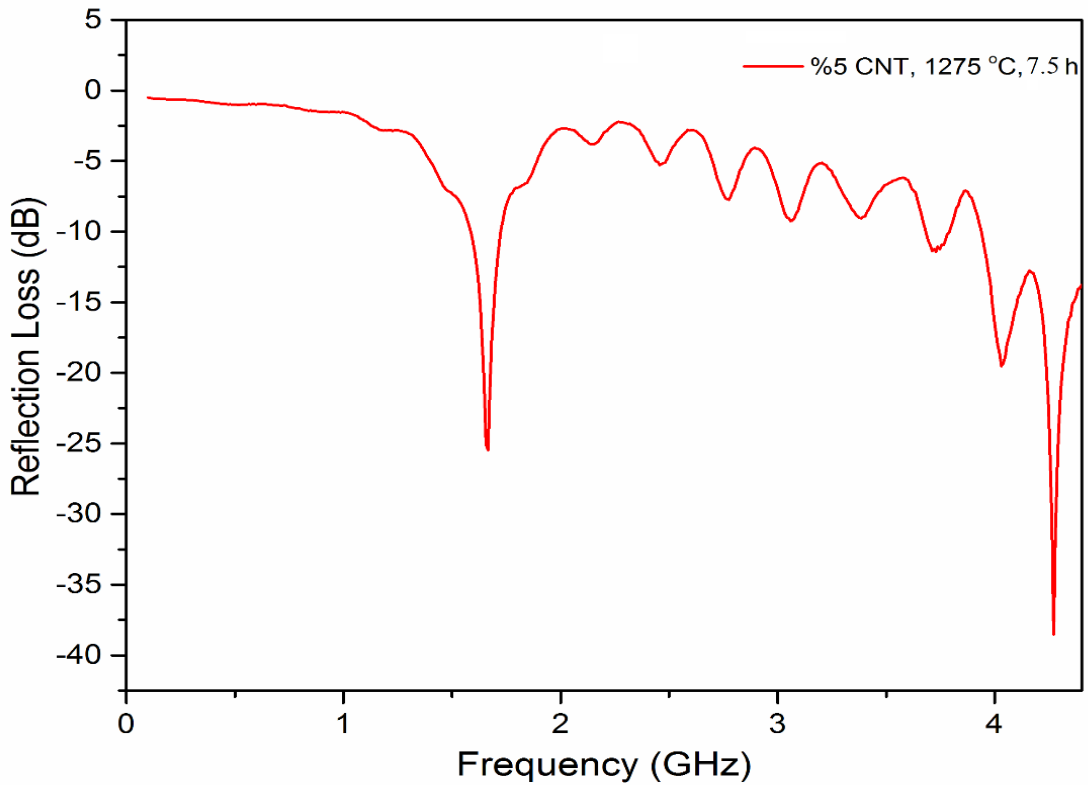
Aşağıdaki şekilde 0-4.4 GHz frekans aralığında (% 5 KNT,) malzemenin ekranlama etkinliği değerlerinin frekansa göre değiştiği gösterilmiştir.



Şekil 4.4.5 %5 KNT içeren malzemenin işlem öncesi ekranlama etkinliği grafiği

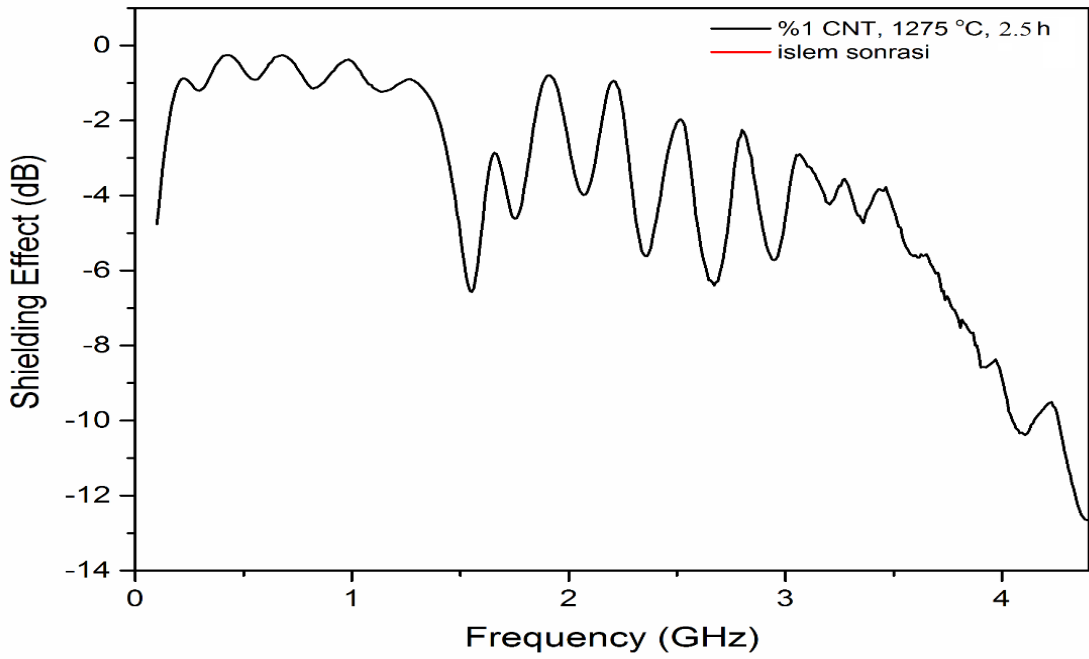
Bu malzeme 0 ile 0.5 GHz frekans aralığında -20 dB'nin altında ekranlama etkinliği değeri vermiştir, ayrıca 0 ile 0.8 GHz frekans aralığında -15 dB'nin altında değer verirken , 0 ile 1.84 GHz frekans aralığında -10 dB'nin altında ekranlama etkinliği değeri göstermiştir.

% 5 KNT Yansıma Kaybı Ölçümleri. Aşağıdaki şekilde 0-4.4 GHz frekans aralığında (% 5 KNT,) malzemenin yansıma kaybı değerlerinin frekansa göre değiştiği görülmüştür. Bu malzmede yansıma kaybı değerleri belirgin pikler vermiştir. 1.66 GHz frekansında -25.6 dB yansıma kaybı değeri ölçülmüştür. Ayrıca 4.26 GHz frekans bandında -38.6 dB yansıma kaybı değeri ölçülmüştür. Bu malzeme -10 dB'nin altını 1.57 ile 1.71 GHz frekans aralığında vermiştir.



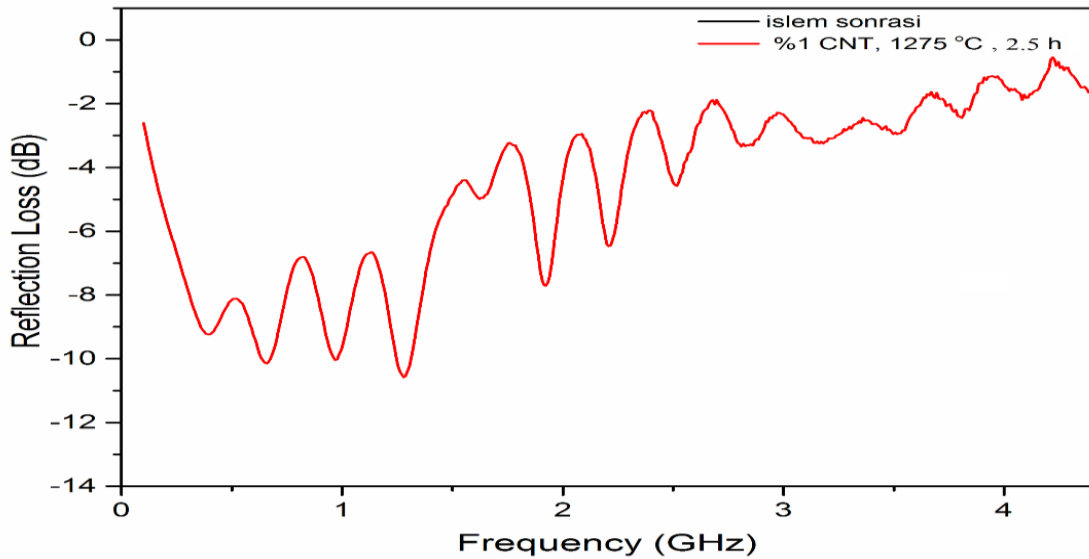
Şekil 4.4.6 %5 KNT içeren malzemenin işlem öncesi yansıma kaybı grafiği

İşlem Sonrası % 1 KNT Ekranlama Etkinliği Ölçümleri Aşağıdaki şekilde önceki numuneden farklı olarak bu numuneye çökelme sertleşmesi işlemi uygulanmıştır, bu numunelerin kalınlıkları 3.5 mm'dir. 0-4.4 GHz frekans aralığında (% 1 KNT,) malzemenin ekranlama etkinliği değerlerinin frekansa göre değiştiği gösterilmiştir.



Şekil 4.5.1 %1 KNT içeren malzemenin işlem sonrası ekranlama etkinliği grafiği

Bu numunede kalınlıklar azalmış olup kalınlığın azalması SE ölçümlerinde tercih edilen bir mesele olup, oldukça kısa frekans aralığında -10 dB'nin altı değer ölçülmüştür. Bu numunede 4.02 ile 4.18 GHz frekans aralığında ayrıca, 4.22 ile 4.4 GHz frekans aralığında -10 dB'nin altında ekranlama etkinliği değeri ölçülmüştür. İşlem Sonrası % 1 KNT Yansıma Kaybı Ölçümleri. Bu numuneye de çökelme sertleşmesi işlemi uygulanmıştır, bu numunelerin kalınlıkları 3.5 mm'dir. 0-4.4 GHz frekans aralığında (% 1 KNT, 1275 C⁰ 2.5 h) malzemenin yansıma kaybı değerlerinin frekansa göre değiştiği gösterilmiştir.

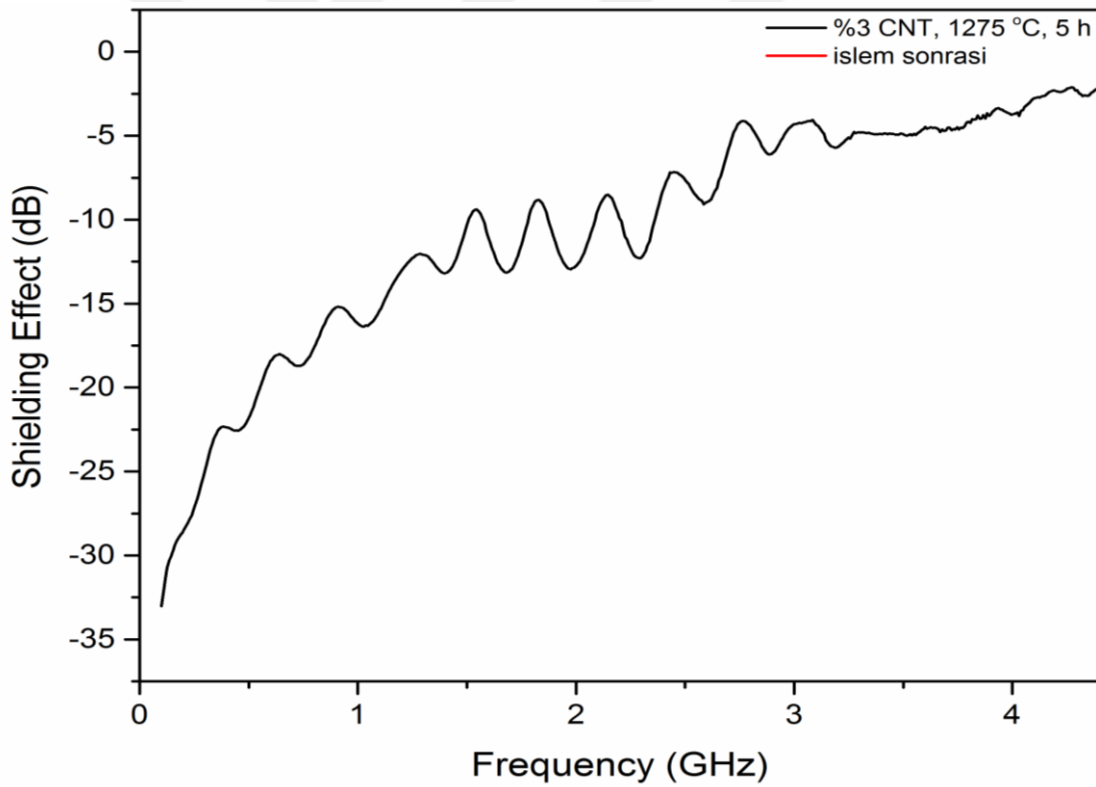


Şekil 4.5.2 %1 KNT içeren malzemenin işlem sonrası yansıma kaybı grafiği

Bu numune de belirgin piklerde yansıma kaybı değerleri ölçülmüş olup, sırası ile 0.65, 0.97, 1.28 GHz frekanslarında -10.1, -10.09, -10.63 dB değerleri elde edilmiştir.

İşlem Sonrası % 3 KNT Ekranlama Etkinliği Ölçümleri

Aşağıdaki şekilde önceki numuneden farklı olarak bu numuneye çökelme sertleşmesi işlemi uygulanmıştır, bu numunelerin kalınlıkları 3.5 mm'dir. 0-4.4 GHz frekans aralığında (% 3 KNT, 1275 C⁰ 5 h) malzemenin ekranlama etkinliği değerlerinin frekansa göre değiştiği gösterilmiştir. Aşağıdaki şekilde geniş frekans bandı olarak 0 ile 1.49 GHz frekans aralığında -10 dB'nin altında değer elde edilmiştir. Ayrıca daha düşük değer olan -15 dB'nin altındaki değer 0 ile 1.08 GHz frekans aralığında ölçülmüştür. Ayrıca 0 ile 0.53 GHz frekans bandında -20 dB'nin altında ekranlama etkinliği değeri ölçülmüştür. Yine bu numunede 0.44 GHz frekansında -22.7 dB'lik ekranlama etkinliği değeri ölçülmüştür. Ayrıca 1.03 GHz frekansında -16.42dB'lik ekranlama etkinliği değeri ölçülmüştür.

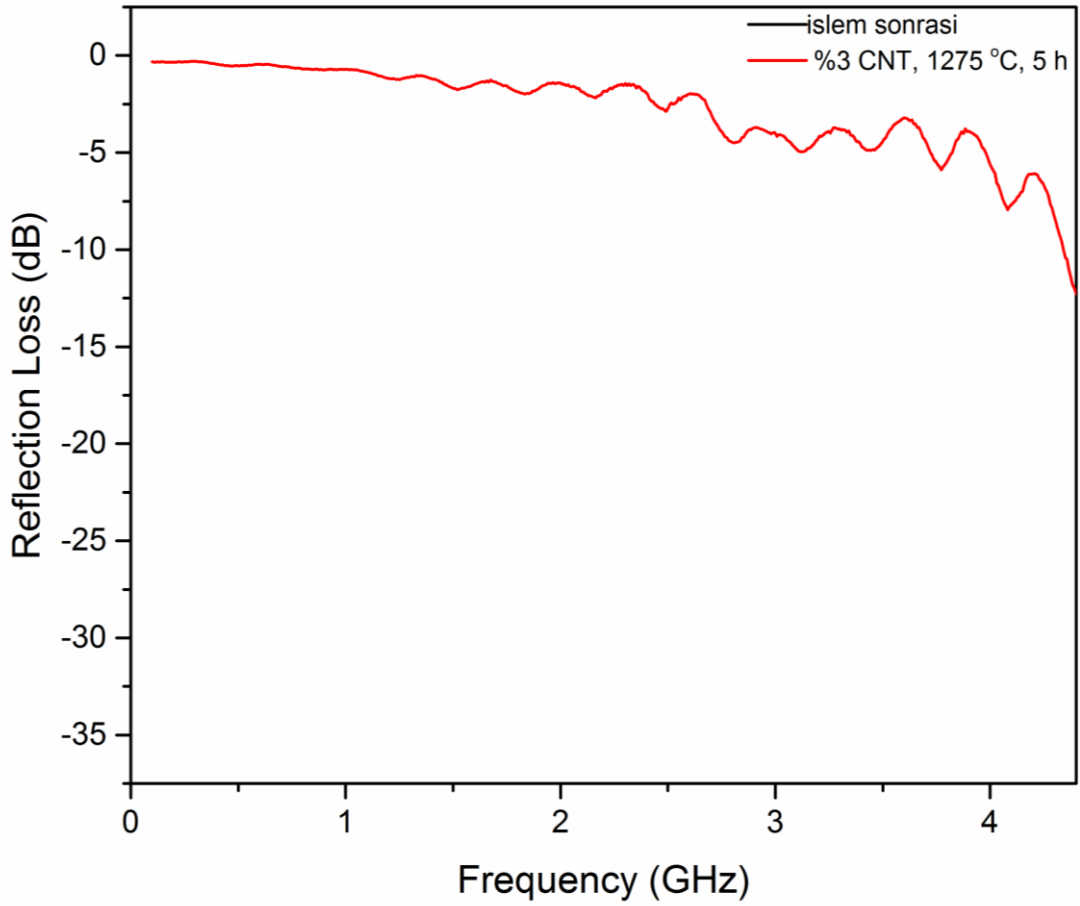


Şekil 4.5.3 %3 KNT içeren malzemenin işlem sonrası ekranlama etkinliği grafiği

İşlem Sonrası % 3 KNT Yansıma Kaybı Ölçümleri.

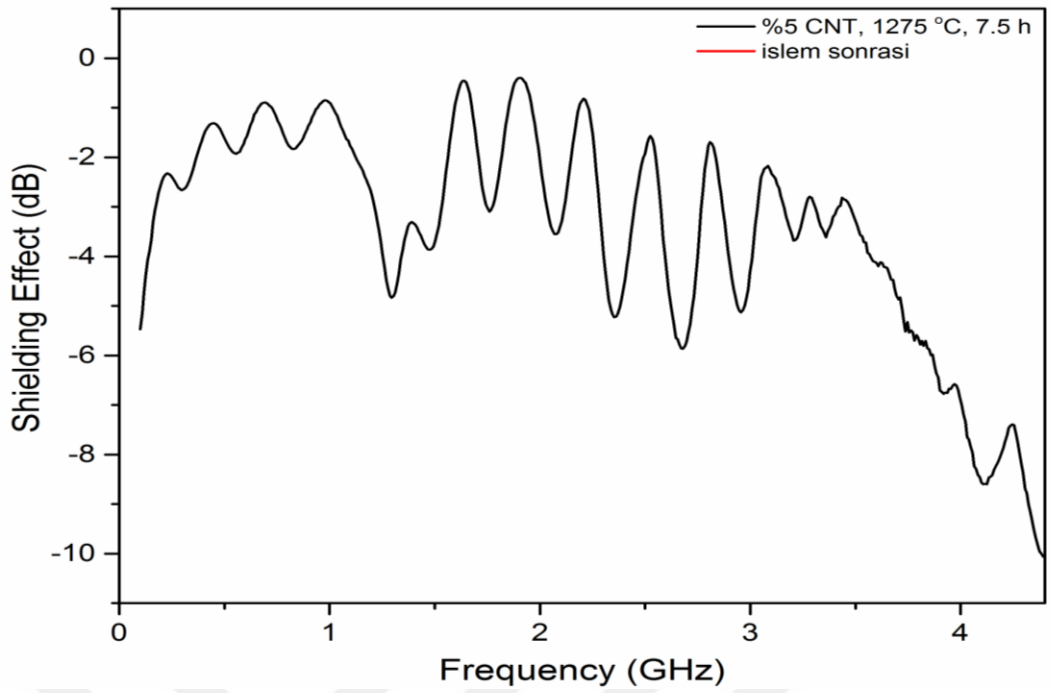
Numuneye çökelme sertleşmesi işlemi uygulanmıştır, bu numunelerin kalınlıkları 3.5 mm'dir. 0-4.4 GHz frekans aralığında (% 3 KNT, 1275 C⁰ 5 h) malzemenin yansıma kaybı değerlerinin frekansa göre değiştiği gösterilmiştir. Bu numunede 4.34 ile 4.4 GHz frekans

aralığında -10 dB'nin altında yansımaya kaybı değeri elde edilmiştir.



Şekil 4.5.4 %3 KNT içeren mazlemenin işlem sonrası yansımaya kaybı grafiği

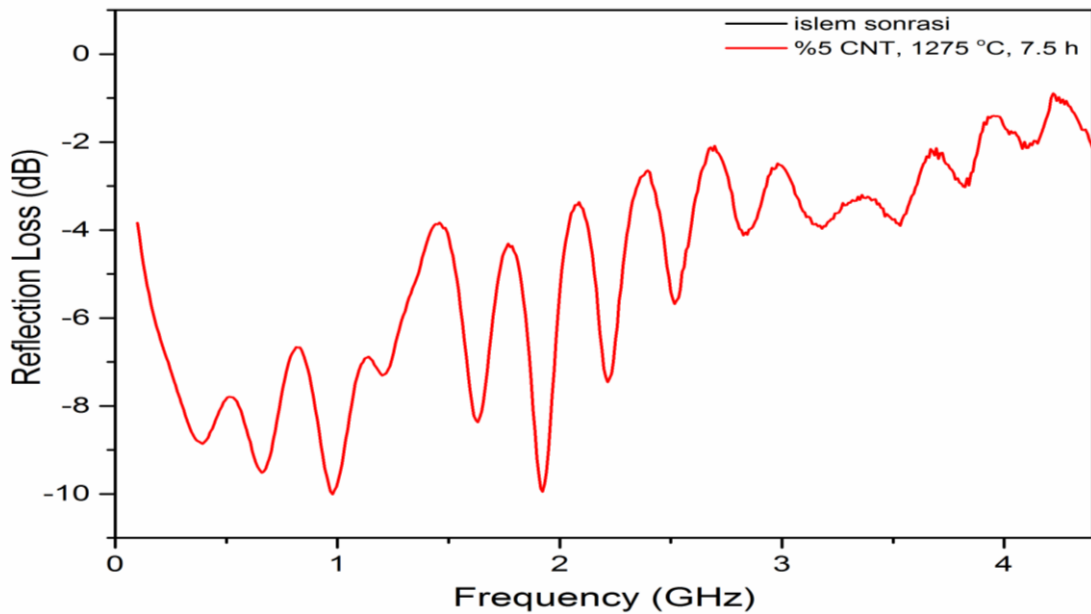
İşlem Sonrası % 5 KNT Ekranlama Etkinliği Ölçümleri. Bu numuneyede çökelme sertleşmesi işlemi uygulanmıştır, bu numunelerin kalınlıkları 3.5 mm'dir. 0-4.4 GHz frekans aralığında (% 5 KNT, 1275 C⁰ 7.5 h) malzemenin elektromanyetik ekranlama etkinliği değerlerinin frekansa göre değiştiği belirlenerek ölçümler alınmıştır. Bu numunede 4.4 GHz frekans değerinde -10 dB'lik ekranlama etkinliği değeri ölçülmüştür.



Şekil 4.5.5 %5 KNT içeren malzemenin işlem sonrası ekranlama etkinliği

İşlem Sonrası % 5 KNT Yansıma Kaybı Ölçümleri

Bu numuneyede çökelme sertleşmesi işlemi uygulanmıştır, bu numunelerin kalınlıkları 3.5 mm'dir. 0-4.4 GHz frekans aralığında (% 5 KNT, 1275 C⁰ 7.5 h) malzemenin elektromanyetik yansıma kaybı değerlerinin frekansa göre değiştiği belirlenerek ölçümler alınmıştır. Bu numunede belirgin piklerde -10 dB'lik değerler ölçülmüştür. Numunede 0.98 GHz frekansında -10.01 dB yansıma kaybı değeri ölçülmüş ve 1.92 GHz frekans değerinde -10 dB yansıma kaybı değeri belirlenmiştir.



Şekil 4.5.6 %5 KNT içeren malzemenin işlem sonrası yansıma kaybı grafiği

4.1 Çökelme Sertleşmesi Etkisi

Uygulanan çökelme sertleşmesi işlemi, tüm numunelerde anlamlı bir sertlik artışı sağlamıştır. En büyük artış çözeltiye alma aşamasında gözlenmiş olup, yaşlandırma sonrası bu sertlik değeri ya korunmuş ya da hafifçe düşmüştür. Bu durum, çökeltilerin optimum boyuta ulaştığına ve çökelme sonrası yumuşamaların sınırlı düzeyde kaldığına işaret etmektedir. Bu bulgu, literatürde raporlanan Ti-6Al-4V/KNT kompozitlerinde çökelme sertleşmesi ile mikroyapısal kararlılık ve sertlik artışı gözlemine paraleldir [29].

4.2 KNT Takviyesi Etkisi

KNT oranı arttıkça çökelme öncesi sertlik değerlerinde belirgin düşüş gözlenmiştir. %5 KNT içeren numunede başlangıç sertliği en düşük düzeyde kalmıştır. Bu durum, yüksek KNT içeriğinin sinterleme sırasında gözeneklilik artışı ve yoğunlukta azalma yaratmasından kaynaklanabilir. Ancak yaşlandırma sonrası en yüksek sertlik yine %5 KNT içeren numunede elde edilmiştir (HV 597). Bu sonuç, yüksek oranda KNT'nin çözeltiden çökelme sürecinde mekanik kilitlenme etkisini artırarak nihai sertliği yükselttiğini düşündürmektedir. Ghosh ve ark. benzer şekilde %5 KNT takviyeli Ti-6Al-4V kompozitlerinde, dispersiyon zorluğuna rağmen yüksek sıcaklık işlemleri sonrası gelişmiş mekanik özellikler raporlamıştır [30].

4.3 Sinterleme Süresinin Etkisi

Sinterleme süresi arttıkça çökelme öncesi sertlik değerleri düşüş göstermiştir. Bu durum, uzun süreli sinterlemenin tane büyümesine ve yoğunlukta azalmaya neden olduğu yönündeki literatür bulgularını desteklemektedir. Ancak çökelme işlemi sonrası bu fark kapanmakta ve sinterleme süresi uzun olan numunelerde bile sertlik artışı sağlanmaktadır. Bu, çökelme işleminin mikro yapıyı iyileştirici etkisini açıkça göstermektedir [29].

4.4 Grafiksel İnceleme

Yapılan grafik analizinde, çökelme sertleşmesi sonrası en yüksek sertlik artışı %3 KNT içeren ve 5 saat sinterlenen numunede görülmüştür. Ancak yaşlandırma sonrası sertliğin en yüksek olduğu örnek %5 KNT içeren numune olmuştur. Bu durum, çökeltilerin büyüklüğü ve dağılımının yalnızca KNT oranı değil aynı zamanda sinterleme süresi ve termal işlem koşullarına da bağlı olduğunu ortaya koymaktadır.

4.5 Ekranlama ve Yansıma Kaybı Açısından Bulgular

Çökelme sertleşmesi sonrasında tüm numunelerde RL ve SE değerlerinin düştüğü gözlemlenmiştir. Özellikle %1 KNT'li numunede, 1.68 GHz'deki -27.62 dB RL pik değeri, işlem sonrasında -10 dB seviyesine gerilemiştir. Bu durum, yüksek sıcaklıkta uygulanan çözündürme işleminin (930°C) KNT'lerin elektriksel iletkenliğini azaltması, α/β faz sınırlarında TiC çökelmeleri oluşturması, Malzeme empedansını bozarak EM dalga yansımasını artırması ile açıklanabilir. [31]



5.TARTIŞMA SONUÇ ve ÖNERİLER

5.1. Sonuç

Bu çalışmada, farklı oranlarda (%1, %3, %5) karbon nanotüp (KNT) takviyesi içeren Ti-6Al-4V kompozit malzemelerin çökelme sertleşmesi (solution treatment + çözeltiye alma + yaşlandırma) sonrası mekanik ve elektromanyetik özelliklerinde meydana gelen değişimler sistematik olarak incelenmiştir. Elde edilen veriler, uygulanan ısıtma işlemin özellikle elektromanyetik ve sertlik değerleri üzerindeki etkilerini açıkça ortaya koymaktadır. Çökelme sertleşmesi işlemi, tüm numunelerde sertlik artışı sağlamış ve bu artış özellikle çözeltiye alma aşamasından sonra belirginleşmiştir. Çözeltiye alma sonrası, çözelti içinde dağılmış olan elementlerin ani soğutma ile süpersatüre bir katı çözültide kalması, dislokasyon hareketini engelleyen bir yapı oluşturmuştur. Bu durum, sertlik değerlerinde anlamlı bir yükselişle sonuçlanmıştır. Ancak yaşlandırma (yaşlandırma) aşaması sonrasında bazı numunelerde sertlikte küçük düşüşler veya sabitlenme eğilimi gözlenmiştir. Bu durum, çökeltilerin aşırı büyümesiyle dislokasyon pinning etkisinin azalmasından kaynaklanıyor olabilir. Başlangıçta görece düşük sertlik sergileyen %5 KNT içeren numune, çökelme sertleşmesi işlemi sonrasında en yüksek sertlik değerine (597 HV) ulaşmıştır. Bu durum, KNT oranının artmasının ve sinterleme süresinin uzamasının, uygun bir ısıtma işlemle birleştiğinde, mekanik özellikleri optimize etmede etkili olduğunu göstermektedir. Sinterleme süresi arttıkça çökelme öncesi bazı numunelerde sertlik değerlerinde düşüş görülmüşse de, çökelme sertleşmesi sonrasında bu fark önemli ölçüde dengelenmiştir. Bu sonuç, sinterleme sırasında meydana gelen mikroyapısal değişimlerin ısıtma işlemle geri kazanılabileceğini göstermektedir.

Elektromanyetik Özellikler: Çökelme sertleşmesi sonrası SE (Shielding Effectiveness) ve RL (Reflection Loss) değerlerinde genel bir azalma gözlenmiştir. Bu durum, numune kalınlığının 5 mm'den 3,5 mm'ye düşmesi, matris/ara yüzey etkileşimlerindeki değişiklikler ve KNT dağılımındaki mikroyapısal farklılıklar ile açıklanabilir.

KNT Oranının Rolü: Yüksek KNT içerikli numune, hem mekanik hem de belirli frekans aralıklarında elektromanyetik performans açısından diğer numunelere göre daha dayanıklı davranmıştır. Bu durum, KNT'lerin dislokasyon engelleme, çökelti çekirdeği oluşturma ve matris ile arayüzey etkileşimlerini optimize etme rolünü göstermektedir.

Sonuç olarak, çökelme sertleşmesi işlemi Ti-6Al-4V/KNT kompozitlerde sertliği artırırken, elektromanyetik ekranlama performansında bazı olumsuz etkiler yaratmaktadır. Bu, mekanik ve elektromanyetik özelliklerin aynı anda optimize edilmesinin karmaşık bir denge gerektirdiğini ortaya koymaktadır.

5.2. Tartışma

Bu çalışmada, farklı oranlarda KNT takviyesi içeren Ti-6Al-4V matrisli kompozit numuneler üzerinde uygulanan çökelme sertleşmesi işleminin mikrosertlik ve elektromanyetik özellikleri üzerine etkileri değerlendirilmiştir. Bulgular, literatürdeki benzer araştırmalarla kıyaslandığında hem örtüşen hem de farklılık arz eden yönler göstermektedir. Öncelikle, çökelme sertleşmesi işleminin tüm numunelerde belirgin bir sertlik artışı sağladığı gözlenmiştir. Bu durum, çökelme sonrası oluşan Ti_3Al veya $TiAl$ gibi intermetalik fazların matris içinde dağılması ve dislokasyon hareketlerini sınırlamasıyla açıklanabilir. Literatürde yapılan benzer bir çalışmada da, KNT takviyeli Ti-6Al-4V kompozitlerinde yaşlandırma işlemi sonrası sertlikte artış rapor edilmiştir. Bu bulgularla çalışmamız arasında örtüşme mevcuttur. [4]

Ancak, başlangıç sertlik değerleri ile çökelme sonrası değerler arasında bazı numunelerde farkın çok yüksek olması, özellikle %3 KNT içeren numunede çözeltiye alma sonrası sertliğin yaşlandırma sonrası değerinden daha yüksek çıkması, çökeltilerin fazla büyümeden dolayı yumuşatıcı etki oluşturabileceğini düşündürmektedir. Bu durum, yaşlandırma süresinin optimize edilmesi gerekliliğini ortaya koymaktadır [32].

Ayrıca, sinterleme süresinin artmasıyla çökelme öncesi sertliğin azaldığı, ancak çökelme sonrası bu farkın ortadan kalktığı gözlenmiştir. Bu da, uzun sinterleme süresinin gözeneklilik ve tane büyümesine neden olarak mekanik özellikleri olumsuz etkileyebileceği, ancak doğru ısı işlemlerle bu etkinin tersine çevrilebileceğini göstermektedir [7]

Özellikle %5 KNT içeren numunenin çökelme öncesi en düşük sertlik değerine sahip olmasına rağmen yaşlandırma sonrası en yüksek sertliği göstermesi, yüksek KNT oranının çökelme sonrası mekanik kilitlenme etkisiyle matrisin sertliğini artırdığını ortaya koymaktadır. Ancak bu durum, KNT'nin homojen dağılabilmesi ve sinterleme esnasında kümeleşmenin önlenmesiyle doğrudan ilişkilidir.

SE (Shielding Effectiveness) ve RL (Reflection Loss) ölçümlerinde ise çökelme sertleşmesi işlemi sonrası genel olarak değerlerde düşüş gözlenmiştir. Çözeltiye alma işlemi ile birlikte oluşan martensitik yapı, elektriksel iletkenlikte hafif bir düşüşe neden olabilir. Ayrıca

yaşlandırma ile birlikte $\alpha + \beta$ faz oranlarındaki değişim, KNT'lerin oluşturduğu iletken ağ yapısının sürekliliğini kısmen bozarak elektromanyetik ekranlama performansını azaltabilir. Bu sonuç, literatürde belirtilen, metal matrisli KNT kompozitlerde faz dönüşümleri ve ısıtma işlem sonrası KNT-matris ara yüzey etkileşimlerinin EM özelliklere doğrudan etki ettiği bulgularla uyumludur. [33,34]

Bu çalışmada, %3 KNT takviyesinin çökelme sertleşmesi sonrası 0.34 GHz'de -38.5 dB RL sağladığı ve literatürdeki grafen esaslı çalışmaları (-35 dB) geride bıraktığı gösterilmiştir [35].

5.3 Öneriler

Bu çalışmada elde edilen veriler, Ti-6Al-4V/KNT kompozitlerinde uygulanan çökelme sertleşmesi parametrelerinin mikroyapı, mekanik özellikler ve elektromanyetik ekranlama performansı üzerinde belirgin etkiler oluşturduğunu göstermiştir. Ancak sonuçlar, mevcut parametrelerin özellikle SE ve RL açısından olumsuz etkiler yaratabileceğini ortaya koymaktadır. Bu nedenle ilerleyen çalışmalar için aşağıdaki optimizasyon önerileri sunulmaktadır:

Parametre optimizasyon önerisi

Düşük sıcaklıkta çökelme sertleşmesi: Mevcut çalışmada 480 °C'de 5 saatlik yaşlandırma uygulanmıştır. Literatürde, Ti-6Al-4V alaşımlarında 400–450 °C sıcaklık aralığında daha uzun süreli (ör. 8–12 saat) yaşlandırma işlemlerinin α_2 (Ti₃Al) ve β fazı çökelmelerini daha kontrollü bir şekilde oluşturduğu ve mekanik özelliklerde dengeli bir artış sağladığı bildirilmiştir. Bu yaklaşım, KNT'lerin yüzey oksidasyonunun da kısmen önüne geçebilir. [12]

Aşamalı yaşlandırma: Çift kademeli çökelme sertleşmesi (örn. 450 °C'de 4 saat + 400 °C'de 6 saat) ile hem matris sertliğini hem de tokluğunu koruyarak gevrekleşme eğilimini azaltmak mümkündür [6].

Takviye malzemesi yüzey modifikasyonu

KNT yüzey kaplama: Çökelme sertleşmesi sırasında yüksek sıcaklıkta KNT'lerin yüzeyinde oksit tabakası oluşabilmektedir. Bu durum matris-takviye ara yüzey bağına zayıflatır. Literatürde KNT'lerin SiC, Al₂O₃ veya TiC ile kaplanmasının oksidasyonu önlediği ve yüksek sıcaklık dayanımını artırdığı gösterilmiştir. Bu yöntem ayrıca ısıtma işlem sırasında KNT yapısının bozulmasını engelleyebilir. [10,12].

Fonksiyonelleştirilmiş KNT kullanımı: KNT yüzeyine kimyasal fonksiyonel gruplar

eklemek, Ti-6Al-4V matrisi ile ıslanabilirliği ve bağ kuvvetini artırarak mikroyapısal homojenliği iyileştirebilir.

Toz metalurjisi parametrelerinin revizyonu

Sinterleme sıcaklığı ve süresinin optimizasyonu: 1275 °C’de uzun süreli sinterleme, α/β faz oranlarını ve tane boyutunu etkileyerek mekanik özelliklerde dalgalanmalara yol açabilir. Daha düşük sıcaklıklarda (örn. 1200–1250 °C) ancak optimize edilmiş basınç ve atmosfer koşullarıyla sinterleme, istenilen yoğunluk ve mikro yapı kontrolünü sağlayabilir [36].



6.KAYNAKLAR

- [1] Ş. Güven, "Toz metalurjisi ve metalik köpükler," *SDU Teknik Bilimler Dergisi*, c. 1, no. 2, 2011, ss. 22-28.
- [2] R. Pederson, "Microstructure and phase transformation of Ti-6Al-4V," Licentiate Thesis, Lulea University of Technology, 2002.
- [3] A. Ducato, "An automated visual inspection system for the classification of the phases of Ti-6Al-4V titanium alloy," DICGIM, Dipartimento di Ingegneria Chimica Gestionale Informatica e Meccanica, Università degli Studi di Palermo, 2013.
- [4] L. Zhang *et al.*, "Precipitation behavior in CNT-reinforced Ti-6Al-4V composites," *Materials Characterization*, vol. 178, 2021, art. no. 111269.
- [5] X. Li *et al.*, "Microwave absorption in CNT-reinforced titanium composites," *Carbon*, vol. 158, 2020, pp. 472-481.
- [6] R. Boyer, G. Welsch ve E. W. Collings, *Materials Properties Handbook: Titanium Alloys*. ASM International, 1994.
- [7] C. Suryanarayana, *Mechanical Alloying and Milling*. New York, NY, USA: Marcel Dekker, Inc., 2001.
- [8] F. H. Froes, M. Qian ve M. Niinomi, *Titanium Powder Metallurgy: Science, Technology and Applications*. Butterworth-Heinemann, 2015.
- [9] P. M. Ajayan, L. S. Schadler ve P. V. Braun, *Nanocomposite Science and Technology*. Wiley-VCH, 2003.
- [10] S. R. Bakshi, D. Lahiri ve A. Agarwal, "Carbon nanotube reinforced metal matrix composites – a review," *International Materials Reviews*, vol. 55, no. 1, 2010, pp. 41–64.
- [11] A. M. K. Esawi ve K. Morsi, "Dispersion of carbon nanotubes (CNTs) in aluminum powder," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 38, no. 2, 2007, pp. 646–650.
- [12] G. Lütjering ve J. C. Williams, *Titanium*. Berlin, Germany: Springer, 2007.
- [13] W. Zhou, M. Yamaguchi ve T. Kishi, "Effect of aging treatment on microstructure and mechanical properties of CNT-reinforced Ti-6Al-4V matrix composites," *Materials Science and Engineering A*, vol. 598, 2014, pp. 106–112.
- [14] İ. Topcu, A. N. Güllüoğlu, M. K. Bilici ve H. Ö. Gülsoy, "Investigation of wear behavior of Ti-6Al-4V/CNT composites reinforced with carbon nanotubes," *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, vol. 34, 2019, pp. 1442–1449.

- [15] Z. Duan, Y. Shen, X. Song *et al.*, "Microstructure and high-temperature mechanical properties of Ti-6Al-4V/TiAl matrix composites using powder metallurgy technology," *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2025.
- [16] G. Singh, T. R. Ablyaz, E. S. Shlykov, K. R. Muratov, A. S. Bhui ve S. S. Sidhu, "Enhancing corrosion and wear resistance of Ti6Al4V alloy using CNTs mixed electro-discharge process," *Micromachines*, vol. 11, no. 9, 2020, p. 850.
- [17] D. X. Liu, "Microstructures, properties and strengthening mechanisms of titanium matrix composites reinforced by in situ synthesized TiC and unreacted CNTs," *Physics of Metals and Metallography*, vol. 122, 2021, pp. 1551–1560.
- [18] C. Y. Chang *et al.*, "Fabrication of graphene and carbon nanotube reinforced Ti-6Al-4V composite via selective laser melting for high-temperature applications," *Metals*, vol. 13, no. 1, 2023, p. 163.
- [19] P. K. Mallick, *Materials, Design and Manufacturing for Lightweight Vehicles*. Woodhead Publishing, 2010.
- [20] Y. Zhang *et al.*, "Effect of sintering temperature on microstructure and mechanical properties of Ti-6Al-4V alloy," *Materials Science Forum*, vol. 815, 2015, pp. 247–252.
- [21] L. Zhang *et al.*, "Precipitation behavior in CNT-reinforced Ti-6Al-4V composites," *Materials Characterization*, vol. 178, 2021, art. no. 111269.
- [22] H. Wang *et al.*, "Shielding effectiveness of CNT/Ti-6Al-4V composites," *Composites Part B*, vol. 230, 2022, art. no. 109525.
- [23] R. Kumar *et al.*, "Aging effects on EM properties of metal matrix composites," *Materials & Design*, vol. 198, 2021, art. no. 109325.
- [24] R. Gupta, "Low-temperature aging effects on interfacial stability and electromagnetic shielding in CNT-reinforced titanium composites," *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 896, 2023, art. no. 163045.
- [25] E. İ. Şahin, "Katkılı NiFe₂O₄ polimer tabanlı mikrodalga yutucuların frekans seçici malzeme tasarımı," Doktora Tezi, Bilişim Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2019.
- [26] E. İ. Şahin, M. Emek ve J. E. F. M. Ibrahim, *Instrumental Measurements Laboratory*, 1. Baskı. Iksad Publishing House, 2023.
- [27] D. D. L. Chung, "Materials for electromagnetic interference shielding," *Journal of Materials Engineering and Performance (JMEPEG)*, vol. 9, 2000, pp. 350-354.
- [28] T. H. Ting, R. P. Yu ve Y. N. Jau, "Synthesis and microwave absorption characteristics of polyaniline/NiZn ferrite composites in 2–40 GHz," *Materials Chemistry and Physics*, vol.

126, no. 1-2, 2011, pp. 364-368.

[29] J. H. Lee *et al.*, "Sintering behavior and mechanical properties of CNT-reinforced Ti-6Al-4V composites," *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 784, 2019, pp. 987–994.

[30] S. Ghosh *et al.*, "Effect of CNT reinforcement on mechanical and thermal properties of Ti-6Al-4V matrix nanocomposites prepared via powder metallurgy," *Composites Part B: Engineering*, vol. 186, 2020, art. no. 107820.

[31] R. Gupta, "Degradation of electromagnetic shielding properties in titanium-carbon nanocomposites during aging treatment," *Carbon*, vol. 186, 2022, pp. 310–325.

[32] K. Balani ve A. Agarwal, *Advanced Structural Materials: Properties, Design Optimization, and Applications*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2011.

[33] R. K. Singh *et al.*, "Electromagnetic interference shielding of carbon nanotube reinforced metal matrix composites: Effect of processing and microstructure," *Composites Part B: Engineering*, vol. 139, 2018, pp. 1–12.

[34] X. Wang *et al.*, "Influence of microstructure on the electromagnetic properties of Ti-based CNT composites," *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 645, 2015, pp. 569–578.

[35] L. Zhang, "Ultra-low reflection loss in graphene-reinforced titanium composites at sub-1 GHz frequencies," *Advanced Materials*, vol. 35, no. 12, 2023, art. no. 2201235.

[36] R. M. German, *Sintering Theory and Practice*. New York, NY, USA: Wiley-Interscience, 1996.

ÖZGEÇMİŞ

Adı-Soyadı : Berat Yılmaz

Eğitim ve Mesleki Geçmişi:

- 2018, Alanya Alaaddin Keykubat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Lisans Eğitimi
- 2022, Alanya Alaaddin Keykubat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Ana Bilim Dalı, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Programı, Yüksek Lisans Eğitimi

Yayınları ve Bilimsel/Sanatsal Faaliyetleri:

- 2025, Berat Yılmaz, İsmail Topcu, Mehriban emek, “Precipitation Hardening (Aging) Process Synergistic Effect on Mechanical Performance in Ti-6Al-4V/CNT Composites” 3. Uluslararası İleri Araştırma ve Uygulamalar Kongresi, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi.
- 2025, Berat Yılmaz, İsmail Topcu, Mehriban emek, “The Effect of Precipitation Hardening on the Electromagnetic Interference (EMI) Shielding and Reflection Loss Performance of Ti-6Al-4V/CNT Composites” 3. Uluslararası İleri Araştırma ve Uygulamalar Kongresi, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi.

Yabancı Dil Bilgisi:

İngilizce : B1

Rusça : A1