



**CNT/EPOKSİ KOMPOZİTLERDE
NANO KİL TAKVİYESİNİN ELEKTRİKSEL
VE TERMAL ÖZELLİKLER ÜZERİNE
ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Berk TURAN

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Yelda AKÇİN ERGÜN

METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

Temmuz 2023

AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

CNT/EPOKSİ KOMPOZİTLERDE NANO KİL TAKVİYESİNİN
ELEKTRİKSEL VE TERMAL ÖZELLİKLER ÜZERİNE
ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

Berk TURAN

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Yelda AKÇİN ERGÜN

METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

Temmuz 2023

TEZ ONAY SAYFASI

Berk TURAN tarafından hazırlanan “CNT\Epoksi Kompozitlerde Nanokil Takviyesinin Elektriksel ve Termal Özellikler Üzerine Etkisinin Araştırılması” adlı tez çalışması lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca 18 / 07 / 2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından **oy birliği** ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Yelda AKÇİN ERGÜN

Başkan : Prof. Dr. Atilla EVCİN
Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Fatih ÇOLAK
Uşak Üniversitesi, Teknik Bilimler MYO

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Yelda AKÇİN ERGÜN
Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi

Afyon Kocatepe Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun
..... /..... /..... tarih ve
..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

.....

Prof. Dr. İbrahim EROL

Enstitü Müdürü

BİLİMSEL ETİK BİLDİRİM SAYFASI
Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- Atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

24 / 08 / 2023

Berk TURAN

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

CNT/EPOKSİ KOMPOZİTLERDE NANOKİL TAKVİYESİNİN ELEKTRİKSEL VE TERMAL ÖZELLİKLER ÜZERİNE ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

Berk TURAN

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Yelda AKÇİN ERGÜN

Bu tez çalışmasında epoksi matrisli polimer kompozit malzemelerin elektriksel ve termal iletkenliklerini iyileştirmek için çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Karbon nano tüp ilavesinin polimer kompozitlerde elektriksel ve termal iletkenliği arttırdığı ancak bunun için matris içerisindeki dağılımın iyi olması gerektiği literatürde yapılan bazı çalışmalarla ortaya koyulmuştur. Bu çalışmada karbon nanotüplerin epoksi matris içerisinde dağılımını iyileştirmek için nanokil ve amino silan ajan (N-(2-Aminoethyl-3-aminopropyl)trimethoxysilane) kullanılmıştır. Farklı oranlarda karbon nanotüp ilavesi ile üretilen kompozitlere yine farklı oranlarda nanokil ve amino silan ajan takviye edilerek hem karbon nanotüplerin dağılımı hem de elektriksel ve termal iletkenlikleri üzerine etkisi araştırılmıştır.

2023, viii + 64 sayfa

Anahtar Kelimeler: Karbon nanotüp, Termal özellik, Kompozit malzemeler, Nanokil, Elektriksel iletkenlik, Disperse ajanı

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF NANO CLAY REINFORCEMENT ON ELECTRICAL AND THERMAL PROPERTIES OF CNT\EPOXY COMPOSITES

Berk TURAN

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Metallurgy and Materials Engineering

Supervisor: Asst. Prof. Yelda AKÇİN ERGÜN

In this thesis, various studies have been carried out to improve the electrical and thermal conductivity of epoxy matrix polymer composite materials. It has been demonstrated by some studies in the literature that the addition of carbon nanotubes increases the electrical and thermal conductivity in polymer composites, but for this the distribution in the matrix should be good. In this study, nano clay and amino silane agent (N-(2-Aminoethyl-3-aminopropyl)trimethoxysilane) were used to improve the dispersion of carbon nanotubes in the epoxy matrix. The effects on both the distribution of carbon nanotubes and their electrical and thermal conductivity were investigated by adding nano clay and amino silane agents at different rates to the composites produced with the addition of carbon nanotubes at different rates.

2023, viii + 64 pages

Keywords: Carbon nanotube, Thermal property, Composite materials, Nanoclay, Electrical conductivity, Disperse agent

TEŞEKKÜR

Bu araştırmanın konusu, deneysel çalışmaların yönlendirilmesi, sonuçların değerlendirilmesi ve yazımı aşamasında yapmış olduğu büyük katkılarından dolayı tez danışmanım Sayın Dr. Öğr. Üyesi Yelda AKÇİN ERGÜN, araştırma ve yazım süresince yardımlarını esirgemeyen Sayın Dr. Öğr. Üyesi Melih ÖZÇATAL'a ve Arş. Gör. Dr. İ. Sinan ATLI'ya her konuda öneri ve eleştirileriyle yardımlarını gördüğüm hocalarıma teşekkür ederim.

Bu süreçte desteklerini madden ve manen hiç esirgemeyen canım annem Katibe TURAN ve canım babam Hasan TURAN'a arkamda bir dağ gibi durdukları için teşekkür ederim. Aramızda binlerce kilometre yol olsa da her gün arayıp desteğini gösteren abim Eren TURAN'a teşekkür ederim. İyi ki varsınız.

Berk TURAN
Afyonkarahisar 2023

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	iv
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	v
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	vii
RESİMLER DİZİNİ	viii
1. GİRİŞ.....	1
2. POLİMER MATRİSLİ KOMPOZİT MALZEMELER VE NANO TAKVİYELER..	6
2.1 Polimer Matrisli Kompozitler	6
2.1.1 Nanopartikül Takviyeli Kompozit Malzemeler	8
2.1.2 Karbon Nanotüpler.....	10
2.1.3 Nanokiller.....	12
2.1.4 Disperse Ajanları.....	13
2.1.4.1 Silanlar.....	14
2.1.4.2 Triton X-100.....	15
2.1.5 Hibridizasyon Etkisi.....	16
3. LİTERATÜR BİLGİLERİ	18
4. MATERYAL VE METOD	23
4.1 Materyal	23
4.1.1 Numunelerin üretilmesi.....	36
5. TARTIŞMA ve SONUÇ	38
5.1 Elektriksel İletkenlik.....	39
5.2 Termal İletkenlik.....	45
6. KAYNAKLAR	61
ÖZGEÇMİŞ.....	65

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

σ	İletkenlik
COOH	Karboksilik asit
HCl	Hidroklorik asit
nm	Nanometre
μm	Mikrometre
$\mu\Omega$	Mikroohm

Kısaltmalar

ABS	Akrilonitril bütadiyen stiren
AlN	Aluminyum nitrit
BN	Bor nitrür
CFRP	Karbon fiber takviyeli polimer
CNT	Karbon nanotüp
CVD	Kimyasal buhar biriktirme
D.A	Disperse Ajanı
DMPA	Dimetilol hidroksi propil amonyum nitrat
DWCNT	Çift duvarlı karbon nanotüp
GPa	Gigapaskal
HDPE	Yüksek yoğunluklu polietilen
ILSS	İnterlaminar kesme testi
İLTEM	İleri teknoloji merkezi
İPA	İzopropil alkol
KOH	Potasyum hidroksit
MWCNT	Çok duvarlı karbon nanotüp
mPa	Mega paskal
NASA	Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi
PEG	Polietilen glikol
PEI	Polietilenimin
PMMA	Polimetil metakrilat
PMK	Polimer matrisli kompozit
PP	Polipropilen
PPS	Polifenilen sulfid
PVC	Polivinil klorür
SDS	Sodyum dodesil sulfat
SWCNT	Tek duvarlı karbon nanotüp
SEM	Taramalı elektron mikroskobu
TEM	Geçirimli elektron mikroskobu
TWCNT	Üç duvarlı karbon nanotüp

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1 Karbon nanotüplerin çeşitleri	9
Şekil 2.2 Metal olan ve metal olmayan malzemelerin elektrik iletkenliği	12
Şekil 3.1 Hava boşluğunu doldurmak için uygulanan termal arayüz malzemeler	18
Şekil 4.1 Elektriksel iletkenliğin ölçümü için hazırlanan deney düzeneği	38
Şekil 5.1 Disperse ajanı katkılı ve CNT içeren numunelerin elektriksel iletkenliği	41
Şekil 5.2 %0,1'den %1'e kadar değişken oranlı CNT ve %0,5 sabit oranlı nanokil içeren numuneler(bordo renkle gösterilmiş) ve %0,1'den %1'e kadar değişken oranlı nanokil ve %0,5 sabit oranlı CNT içeren numune setlerinin(mavi renkle gösterilmiş) elektriksel iletkenliği	44
Şekil 5.3 %1 oranında CNT ve %0,1'den %1'e kadar artan nanokil içeren numunelerin elektriksel iletkenliği	45
Şekil 5.4 Epoksi, CNT, 1 ve 2 ml disperse ajanı içeren numunelerin termal iletkenlikleri	48
Şekil 5.5 %0,5 nanokil ve artan CNT oranları olan numune seti ile %0,5 CNT ve artan nanokil oranlarına sahip numune setinin karşılaştırılması	49
Şekil 5.6 Epoksi, %1 CNT ve nanokil içeren numune grubunun termal iletkenlikleri	50
Şekil 5.7 Numune setlerinin termal iletkenliğinin karşılaştırılması	51
Şekil 5.8 2ml disperse ajanı ve %1 CNT içeren numunenin SEM görüntüsü	52
Şekil 5.9 1ml disperse ajanı ve %1 CNT içeren numunenin SEM görüntüsü	53
Şekil 5.10 2ml disperse ajanı ve %0,5 CNT içeren numunenin SEM görüntüsü	54
Şekil 5.11 1ml disperse ajanı ve %0,5 CNT içeren numunenin SEM görüntüsü	54
Şekil 5.12 1 ml disperse ajanı %0.5 CNT içeren numunenin SEM görüntüsü	55
Şekil 5.13 2 ml disperse ajanı %0.5 CNT içeren numunenin SEM görüntüsü	56
Şekil 5.14 %0.6 cnt %0.5 kil içeren numunenin SEM görüntüsü	57
Şekil 5.15 %1 cnt %0.5 kil içeren numunenin SEM görüntüsü	58
Şekil 5.16 %0,5 CNT ve %1 nanokil içeren numunenin SEM görüntüsü	59

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 1.1 Yapısal uçak malzemelerinin mekanik özellikleri	2
Çizelge 1.2 Tek duvarlı ve çok duvarlı karbon nanotüplerin teknik özellikleri.....	3
Çizelge 2.1 Polimerik matris malzemelerinin karşılaştırılmalı özellikleri.....	7
Çizelge 2.2 Karbon nanotüplerin ve nanokillerin karşılaştırılması.....	16
Çizelge 4.1 Nanografi ultrasonik homojenizatör teknik özellikleri	24
Çizelge 4.2 MGS LR285 laminasyon reçinesi özellikleri.....	26
Çizelge 4.3 MGS LH 285-286-287 sertleştirici özellikleri	27
Çizelge 4.4 (-COOH) fonksiyonelleştirilmiş çok duvarlı karbon nanotüpleri Saflık: > %96, Dış Çap: 8-18 nm	28
Çizelge 4.5 LCR metre teknik özellikleri.....	33
Çizelge 5.1 CNT oranı düzenli artan ve 1ml disperse ajanı eklentili numunelerin elektriksel iletkenlikleri	40
Çizelge 5.2 CNT oranı düzenli artan ve 2ml disperse ajanı eklentili numunelerin elektriksel iletkenlikleri	41
Çizelge 5.3 Değişken oranlarda CNT içeren numunelerin elektriksel iletkenlikleri	42
Çizelge 5.4 Sabit nanokil ve artan CNT içeren numunelerin elektriksel iletkenlikleri .	43
Çizelge 5.5 Sabit CNT ve artan nanokil içeren numunelerin elektriksel iletkenlikleri..	43
Çizelge 5.6 CNT oranı sabit ve nanokil oranı artırılan numunelerin elektriksel iletkenlikleri.....	45
Çizelge 5.7 Artan CNT oranı ve 1ml disperse ajanı içeren numunelerin termal iletkenlikleri.....	47
Çizelge 5.8 Artan CNT oranı ve 2ml disperse ajanı içeren numunelerin termal iletkenlikleri.....	47
Çizelge 5.9 Sabit nanokil oranı ve artan CNT içeren numunelerin termal iletkenlikleri	48
Çizelge 5.10 Sabit CNT oranı ve artan nanokil içeren numunelerin termal iletkenlikleri	49
Çizelge 5.11 Sabit CNT oranı ve artan nanokil içeren numunelerin termal iletkenlikleri	50

RESİMLER DİZİNİ

	Sayfa
Resim 4.1 RTV-2710 kalıp silikonu	23
Resim 4.2 RAKU-TOOL AC-9012 kalıp yağlayıcı.....	24
Resim 4.3 Wogens %99.9 saflıkta izopropil alkol.....	24
Resim 4.4 Nanografi ultrasonik homojenizatör	25
Resim 4.5 MTOPS MS300HS ısıtıcılı manyetik karıştırıcı	26
Resim 4.6 MGS LR285 laminasyon reçinesi.....	27
Resim 4.7 MGS LH285-286-287 sertleştirici	28
Resim 4.8 Nanografi çok duvarlı karbon nanotüp	29
Resim 4.9 Molchem nanokil	30
Resim 4.10 Metacut-M-250 numune kesme cihazı	31
Resim 4.11 Mitutoya 500-181-30 kumpas.....	31
Resim 4.12 Metkon forcipol 2V numune kesme cihazı.....	32
Resim 4.13 Elecolit 414 gümüş boya.....	33
Resim 4.14 Elektriksel iletkenliğin ölçülmesi için hazırlanan deney düzeneği.....	33
Resim 4.15 Rohde & Schwarz marka HM8118 LCR metre.....	34
Resim 4.16 C-Therm Tci termal iletkenlik analiz cihazı	35
Resim 4.17 SEM görüntüleme cihazı.....	35
Resim 4.18 Kalıp hazırlama	36
Resim 4.19 Sırasıyla %60 epoksi reçine ve %40 reçine sertleştirici karışımı ile hazırlanmış numune, %1 CNT ve %0.5 nanokil içeren gümüş boya ile kaplanmış numune ve %1 CNT ve %0.5 nanokil içeren numune	36

1. GİRİŞ

Yapılabilecek en bilinen tanım ile kompozit malzemeler, makro düzeyde bir araya gelen ve birbiri içerisinde çözünmeyen iki ya da daha fazla malzeme ile oluşur. Kompozitleri oluşturmanın amacı farklı malzemeleri bir araya getirerek, zayıf yönlerini iyileştirmektir. Bu sayede daha iyi ve güçlü özelliklere sahip yeni bir malzeme elde edilmiş olur. Polimer matrisli kompozit(PMK) malzemeler ağırlık, dayanım, performans ve üretim maliyetleri açısından diğer malzemelere göre üstün özellikler gösterirler. Bu nedenle spesifik özellik istenen çalışma alanlarında kullanmak için elverişli bir malzeme türüdür. Örneğin, havacılık alanında üretim prosesinde en önemli faktörlerden birinin ağırlık olduğu bilinmektedir, dolayısıyla farklı malzeme gruplarının yerine PMK'ların kullanımı yıllar boyunca giderek artmıştır. Toplam ağırlık düşürülerek uçakların performansının artırılması amaçlanmıştır, çünkü daha düşük ağırlık daha fazla faydalı yük demektir. Faydalı yüke örnek olarak insan taşıma kapasitesi, daha fazla yük taşıyabilme ve daha uzun havada kalma süresi gösterilebilir. Bir uçak tasarımı için göz önüne alınması gereken önemli etkenler dayanım, rijitlik, malzeme ömrü ve aerodinamik yapıdır. Tüm bunlar göz önünde bulundurularak tasarım yapılırken bir yandan da sağlanabilecek en hafif ağırlık elde edilmek istenir. Bu şartların sağlanması için uzun yıllar boyunca metalik malzemeler kullanılarak çalışmalar yapılmıştır. Metalik malzemeler ve alaşımları maliyet açısından her ne kadar istenileni verse de ağırlık konusunda istenilen noktaya ulaşamamıştır, bundan dolayı araştırmacılar bu süre zarfında yeni malzeme arayışına başlamışlardır. Kompozit malzemelerin ünlenmesi böylelikle başlamıştır. Kompozit malzemeler ilk olarak motor kaplamaları, spoiler ve sabit paneller gibi önemli derecede yüke maruz kalmayan parçalarda kullanılmaya başlamıştır. Günümüze kadar gelen süreçte çalışmalarla beraber kompozit malzemelerin kullanım alanları da artmıştır. Son 30 yılda kompozit malzeme kullanımı Boeing 737 ve 747'de %5'in altından Airbus A320'de %17'nin üzerine çıkmıştır. 1990 yılında piyasaya sürülen Airbus A320'de, yaklaşık %17 kompozit ve %66 alüminyum malzeme kullanılmaktadır. Boeing 787 Dreamliner modelinin, yapısal ağırlığa göre yaklaşık %50'si kompozit malzemedir (KSD 2020).

Çizelge 1.1 Yapısal Uçak Malzemelerinin Mekanik Özellikleri.

	Yoğunluk ρ (gr/cm ³)	Elastik Modül E (Gpa)	Özgül E Modül E/ ρ	Çekme Muk. σ (Gpa)	Özgül Çek. Muk. σ/ρ	Maks. Şek. Değ. (%)	
KONVANSİYONEL	ÇELİK (3140)	7,9	200	25	1,85	0,24	11
	ALÜMİNYUM ASG (6061) T6	2,7	70	26	0,35	0,13	11
	ALÜMİNYUM AU4G1 (2024) T4	2,8	73	26	0,29	0,21	11
	ALÜMİNYUM A25G4 (7075) T6	2,8	76	27	0,45	0,16	11
	TİTANYUM T6V	4,4	119	27	1,14	0,26	14
KOMPOZİT	BOR/EPOKSİ	2,1	270*	129*	2*	0,95*	6,5*
	BOR/ALÜMİNYUM	2,7	225**	83*	1,25*	0,46*	10*
	GRAFİT/EPOKSİ	1,7	208* 10,3**	122*	1,34* 0,03**	0,79*	10*
	KARBON/EPOKSİ	1,5	142* 10,3**	95*	1,6* 0,07**	1,06*	1,1* 0,57*
	KEVLAR/EPOKSİ	1,35	80* 5,5*	59*	1,38* 0,03**	1,02*	1,7* 0,57**
	KARBON/POLYESTER	1,68	127,5* 7,6**	76*	1,52* 0,04**	0,9*	1,2* 0,53**
	KEVLAR/POLYESTER	1,4	76* 5,5**	54*	1,2* 0,02**	0,86*	1,6* 0,4**
	CAM/POLYESTER	1,8	39* 9,6**	22*	1,13* 0,02**	0,63*	2,8* 0,21**
* : Elyaf lar yönünde							
** : Elyaf lara dik yönde							

Çizelge 1.1’de yapısal uçak malzemelerinin özellikleri verilmiştir. Bu çizelgeye göre Fiber/Epoksi komp ozitlerinin özgül mukavemetinin en yüksek malzeme olduğu görülmektedir. Kompozit malzemelerin üretim ve tasarım aşamasındaki teknik gelişimi, onun üretim maliyetini düşürme ve sistem etkinliğini, güvenliğini ve güvenilirliğini artırma aşamasına getirmiştir. Ayrıca malzemenin farklı şekillere kalıplanabilir olması tasarımcıyı metalin kesilmesi ve şekil verilmesi gibi zorluklardan bağımsız kılmıştır. PMK malzemelerin mukavemetli ve ağırlık yönünden avantajlı olmalarının yanı sıra kolay şekillendirilme ve korozyona karşı direnç gibi avantajlara da sahiptir. Yanı sıra titreşim sönümleme ve esneme esnasında çatlak oluşumuna rastlanılmaması da

metallere göre yorulma olayına daha dirençli olduğu görülür(Harris 2011). En önemli dezavantajı olarak maliyeti gösterilen kompozit malzemeden üretilen kısımlarda, parça ve bağlama elemanı sayısı azalmakta, üretilen parçanın dizaynı, bakım-onarımı, geliştirilmesi gibi aşamalarda da daha az parça kullanılmaktadır (Güler 2003, Harris 2011). Üretim maliyeti yüksek olan kompozit malzemelerin daha az işçilik gerektirdiği için toplam maliyeti azalttığı Amerika Birleşik Devletleri Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi (NASA) tarafından onaylanmıştır (İnt.Kyn.1). Bu avantajlar göz önüne alındığında kompozit malzemelerin birçok alanda yaygınlaştığı görülmektedir. Bu yaygınlaşma ile daha fazla kişi kompozit malzemeler hakkında AR-GE çalışmaları yaparak malzemeyi optimum şekilde nasıl kullanacağını araştırmıştır. Endüstriyel uygulamaların hemen hepsinde daha küçük boyutlarda ve daha yüksek performanslı malzemeler kullanılmak istenmektedir. Bundan dolayı yıllar boyu gelen bu süreçte farklı çalışmalar yapılmış ve kompozitlere farklı mekanik özellikler eklenmek isterken aynı zamanda ağırlıktan tasarruf edilmek istenmiştir. Tam bu noktada çalışmaların içine giren malzemeler ise nanotakviyeler olmuştur. Nanotakviyeler uçaklarda ve otomobillerde mukavemet, sertlik, rijitlik, elektriksel ve termal iletkenlik özelliklerini artırma, yapısal performans sergileyen beton, ahşap ve asfalt gibi üretim, vücudun implant ve protezleri reddetme riskini düşürme açısından biyomedikal alanında kullanımına başlanmıştır. Fakat araştırmacılar bugüne kadar kullanımı işlevselleştirmeye yönelik çalışmaların çoğunda laboratuvarı uygun olan fakat endüstriyel anlamda kullanıma uygun olmayan reaktifler kullanmışlardır. Çizelge 1.2’de Tek Duvarlı Karbon Nanotüp(SWCNT) ve Çok Duvarlı Karbon Nanotüplere(MWCNT) ait bazı teknik özellikler verilmiştir.

Çizelge 1.2 Tek duvarlı ve çok duvarlı karbon nanotüplerin teknik özellikleri (Pul 2019).

Özellikler	SWCNT	MWCNT
Özgül Ağırlık	0.8 g/cm ³	1.8 g/m ³
Elastisite Modülü	~1 TPa	~0,3-1 TPa
Mukavemet	50-500 Gpa	10-60 Gpa
Özdirenç	5-50 $\mu\Omega$ cm	5-50 $\mu\Omega$ cm
Termal İletkenlik	3000 W m ⁻¹ K ⁻¹ >700 °C (in air);	3000 W m ⁻¹ K ⁻¹ >700 °C (in air);
Termal Kararlılık	2800°C (in vacuum)	2800°C (in vacuum)

Elastisite modülü, öz direnç, termal iletkenlik ve termal kararlılık özelliklerinde birbirleriyle neredeyse aynı sonuçlara sahip olsalarda MWCNT özgül ağırlık olarak SWCNT'den daha büyük bir değere sahip olduğu görülüyor. Tek duvarlı karbon nanotüplerin ise çok duvarlı karbon nanotüplere göre mukavemet açısından daha geniş ve yüksek bir aralığa sahip olduğunu da söyleyebiliriz. Özgül yüzey alanına bakıldığında ise tek duvarlı karbon nanotüplerin çok duvarlı karbon nanotüplere göre daha fazla olduğunu gözlemlemekteyiz, bunun nedeni çok duvarlı karbon nanotüplerin iç içe geçmiş yapıya sahip olduğu söylenebilir. Karbon alanında yapılan araştırmalar ve deneylere bakıldığında ise CNT'lerin sadece metal malzemelere değil karbon elyaflarına göre de iyi mekanik özellikler gösterdiği söylenebilir. Karbon nanotüplerin 1000 GPa'ya kadar sertliğe, 100 GPa'ya kadar mukavemete ve 6000 W m⁻¹ K⁻¹'e kadar ısı iletkenlik değerlerine sahip olduğu gözlemlenmiştir. Bu çalışmalar, CNT'lerin olağanüstü özelliklere sahip insanoğlunun bildiği en güçlü lifler olduğunu göstermiştir (Bakshi vd. 2010). Yapılan araştırmalarda farklı katkı maddeleri ilave edilerek kompozit malzemenin katkısız kompozitlere kıyasla mekanik ve fiziksel özelliklerinde iyileşmeler olduğu gözlenmiştir. Fakat nanotakviyeli kompozit malzemelerde ki önemli hususlardan bir tanesi faz içerisinde homojen bir dağılım elde edilmesidir. Zira nanotakviyeler topaklanma eğilimindedirler. Yanı sıra malzeme içerisinde katkı olarak eklenecek nanotakviyeler ağırlıkça yüzde miktarları da önemlidir. Raghu ve arkadaşları (2016), nanokil ilavesinin cam fiber takviyeli epoksi matrisli kompozitlerin mekanik özellikleri üzerindeki etkisini araştırdı. Çalışmada belli miktarda nanokil ilavesi ile mekanik özelliklerinin iyileştiği gözlemlendi. Genel olarak çalışmalarda %1-7 nanokil eklenmiştir ancak en iyi sonuçların %1, %3 ve %5'te alındığını bulmuşlardır. Bu sonuçlar neticesinde nanotakviyeli kompozit malzemelerin üretimi ve iyileştirilmesinde yapılan çalışmalarda nanotakviyenin homojen dağılımı ve ağırlıkça yüzdesi son derece önemlidir.

Bu çalışmada CNT'nin mükemmel özelliklerini 'Nasıl daha iyi hale getirebilirim?' sorusuna yanıt ararken nanokil ve karbon nanotüp takviyesi yapılarak numuneler üretilmiş, termal ve elektriksel iletkenlik davranışları izlenmiştir. Karbon nanotüp ve nanokil etkilerini daha kapsamlı gözlemlemek için ağırlıkça farklı oranlarda eklentiler yapılarak üretim yapılmıştır. Kolay gözlenebilir olması için sadece CNT katkılı, hem

CNT hem nanokil katkı ve CNT ve disperse ajanı katkı numuneler üretilmiştir. Öncelikle birbirinin aynısı silikon kalıplar üretilmiş, daha sonra ağırlıkça farklı numuneler mekanik karıştırma sonucu topaklanma olabileceği için ultrasonik ses dalgalarıyla homojen karışımlar elde edilmiştir. Ağırlıkça aynı numuneler tekrar üretilerek bu sefer disperse ajanı ilavesi ile daha homojen numuneler elde edilmesi amaçlanmıştır. Üretilen polimer matrisli nano takviyeli kompozit malzemelerin elektriksel iletkenlikleri ve termal özelliklerinin olumlu yönde değişeceği öngörülmüştür. Bundan dolayı ilave edilen nanotakviyelerin ve disperse ajanının malzeme üzerindeki etkisi araştırılmış ve sonuç kısmında karşılaştırılmıştır.



2. POLİMER MATRİSLİ KOMPOZİTLER VE NANO TAKVİYELER

2.1 Polimer Matrisli Kompozitler

PMK'ler, günümüzde hızla gelişen bir araştırma alanıdır. PMK malzemeler, bir polimer matris içerisine takviye olarak fiber veya farklı takviye fazları konularak makro düzeyde birleştirilmesiyle meydana gelen malzemelerdir. Farklı malzemelerin birleştirilmesiyle elde edilen PMK malzemeler hem takviye fazı hem de matris malzemesinin özelliklerinden çok daha iyi özellik gösterirler. Bu malzemelerin özellikleri, kimyasal yapısı, üretim teknikleri ve uygulama alanları gibi konular akademik çevreler tarafından incelenmektedir. PMK'lerin geniş bir kullanım alanı vardır. Örneğin, havacılık endüstrisinde yapısal parçalar, motor parçaları ve kaplamalar için kullanılırlar. Otomotiv sektöründe şasi, gövde parçaları, fren sistemleri, süspansiyonlar ve egzoz sistemleri için kullanılır. Ayrıca, spor malzemeleri, medikal cihazlar, inşaat malzemeleri ve diğer endüstriyel ürünler de PMK'lerden yararlanabilir. PMK'lerin performansını artırmak için birçok çalışma yapılmaktadır. Bunlar arasında takviye malzemelerinin tasarımı, polimer matrisinin sentezi ve karakterizasyonu, kompozit üretim teknikleri ve son ürünün mekanik, termal ve elektriksel özelliklerinin test edilmesi yer alır. Kompozit malzemeler temel olarak, malzemenin özelliklerinin iyileştirilmesi istenen bir durumda ana matris malzemeyi ve bu ana malzemenin performansını iyileştirmek için yapıya eklenen takviye malzemesinin belirli bir prosesle yapıya ilavesi ile üretilmektedir (Hsiao vd. 2012). PMK'ler üretim kolaylıkları ve nispeten düşük maliyetleri nedeniyle genel endüstride en yaygın kullanılan kompozit türüdür. Burada matris fazı denilen ana yapı polimer reçine türevlerinden oluşur. Polimer reçineler sahip oldukları bağlara göre termoplastik ve termoset gruplarına ayrılırlar. Termoset polimerler çapraz bağa sahiptirler, ısıtıldıklarında sert ve rijit hal alırlar. Isıyla yalnızca bir kez şekillendirilebilmektedirler. Termoplastiklere göre daha gevrek özellik göstermektedirler. Epoksi, polyester, fenolik, melamin, ürefoormaldehit, silikon ve poliüretan gibi termoset matrisler kompozit endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Sönmez ve Şatır 2009). Termoplastikler ise zayıf lineer bağlara sahiptirler ve ısıtılarak yeniden şekillendirilebilir. Kompozit endüstrisinde yaygın olarak polietilen, polipropilen, polivinilklorür (PVC), Akrlonitril Bütadien Stiren (ABS), Poliamid, Akrlilik, Polikarbonat gibi termoplastik matrisler kullanılmaktadır (Sönmez ve Şatır 2009). Ürün kalıplama aşamasında ilgili reçine çeşitli yöntemlerle takviye fazına

emdirilir. Birçok kompozit ürün üretim tekniğinde, reçine emdirme aşaması, üretim/kalıplama işlemi sırasında gerçekleştirilir. Ek olarak, fiberlerden üretilerek kumaş haline getirilen takviye malzemesinin önceden reçine emdirme yöntemi de söz konusudur. Önceden reçine emdirilmiş kumaşlar “prepreg” veya “preimpregnated” adını almaktadır ve kalıplama/ şekillendirme öncesinde matris reçinenin sertleşip kürleşmesini önlemek için soğuk depolarda saklanmaktadır. Emdirilen bu reçineler genel olarak termoset reçinelerdir. Oda sıcaklığında bekleyen prepreglerin şekillendirilmesi için belli zaman sınırı vardır. Bu sürenin ardından prepreg emdirilmiş reçine kürleşmeye başlayacağı için prepreg tekrar şekillendirilemez hale gelmektedir (Töre 2011).

Çizelge 2.1 Polimerik matris malzemelerinin karşılaştırmalı özellikleri (Sönmez ve Şatır 2009).

Uygulama	Özellik	Termoset Matris	Termoplastik Matris
Matris	Formülasyon	Karışık	Daha Basit
	Eriyik Akışkanlığı	Düşük	Daha Yüksek
	Maliyet	Düşük - Orta	Düşük - Yüksek
Pregpreg	Raf Ömrü	Oldukça Düşük	Yüksek
Kompozit	Proses Çevrimi	Oldukça Uzun	Oldukça Kısa
	Ürün Boyutları	Çok Büyük Olabilir	Küçük - Orta
	Çözücülere Dayanım	İyi	Zayıf – İyi
	Hasar Toleransı	Zayıf - Mükemmel	Zayıf – İyi
	Üretim Kolaylığı	Emek Yoğun	Daha Az Emek Yoğun

PMK’ler elle serme, püskürtme, filament sarma, pultrüzyon, basınçlı kalıplama, reçine transfer kalıplama, otoklav fırınında kalıplama, vakum torbalama, infüzyon, enjeksiyon, savurma kalıplama gibi yöntemler ile üretilmektedir. Bu üretim yöntemleri metal ve seramik matrisli kompozit malzemelere göre hem maliyet açısından düşük hem de kolay şekillenebilme imkanı sunmaktadır. Günümüzde kompozit üretimi için geleneksel yöntemlere ek olarak yeni/geleneksel olmayan üretim teknikleri geliştirilmektedir. Eklemeli imalat olarak bilinen bir üç boyutlu yazıcı teknolojisi kullanılarak kompozit ürünlerin basılması, yeni bir üretim teknolojisini örnek teşkil edebilir(Çelik ve Gür 2021).

PMK'ların genel özellikleri şunlardır:

Düşük Yoğunluk

PMK'lar metallere göre düşük yoğunluğa sahiptirler. Bu nedenle daha hafiftirler.

Yüksek Mukavemet

Takviye fazları sayesinde PMK'lar yüksek mukavemete sahiptirler. Bu takviyelere örnek karbon fiber, cam elyafı ve aramid fiberler verilebilir.

Yüksek Dayanıklılık

Darbe dayanımı ve aşınma direnci gibi yüksek dayanıklılık özellikleri gösterirler.

Elektriksel İletkenlik

Polimer kompozitlerin geneli elektrik iletkenliği konusunda zayıftır. İletken lifler veya metal parçacıkları ile iletkenlikte artış görülebilir.

Termal İletkenlik

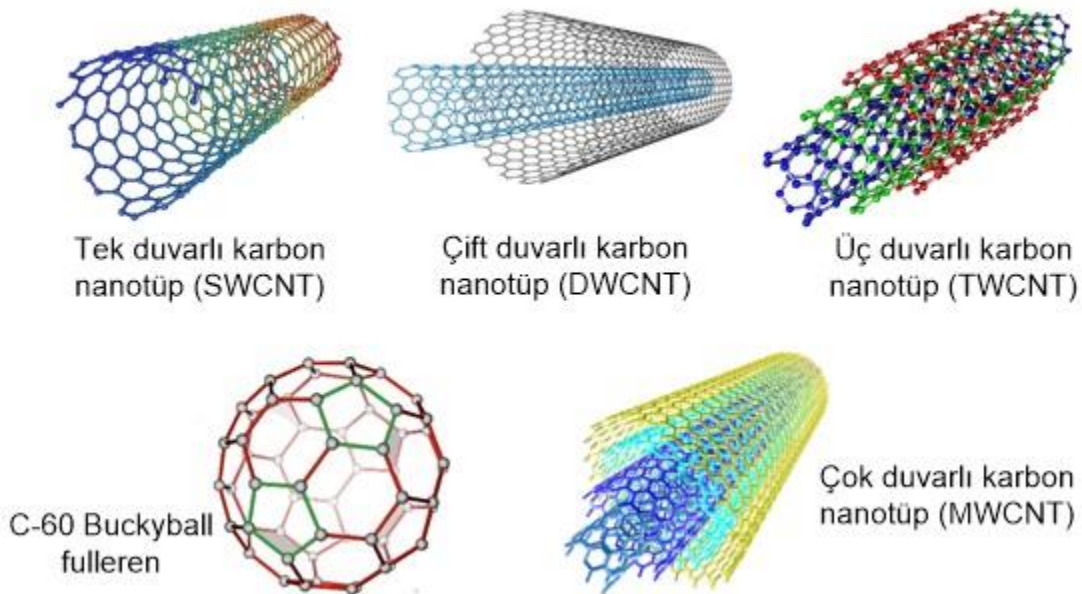
Termal iletkenlikleri düşüktür fakat bazı eklentiler ile geliştirme çalışmaları yapılmaktadır. Bunlar seramik, metal ve karbon bazlı takviyelerdir.

2.1.1 Nanopartikül Takviyeli Kompozit Malzemeler

Nanotakviyeli polimer kompozit malzemeler, ağırlık ve dayanıklılık açısından metal malzemelerden daha üstündür. Bu nedenle, bu malzemelerin üretimi ve kullanımı, özellikle hafif ve dayanıklı malzemeler gerektiren endüstriler için büyük bir avantaj sağlar. Geleneksel kompozitlere kıyasla da polimer matrise nanoparçacıkların eklenmesi malzemenin mekanik, termal ve elektriksel özelliklerini önemli ölçüde artırabilir. Ayrıca, nanopartiküllerin küçük boyutları, malzemenin özelliklerini moleküler düzeyde değiştirmelerine olanak tanıyarak termal ve elektriksel iletkenlikte gelişmelere yol açar. Şekil 2.1'de görüldüğü üzere karbon nanotüpler Tek Duvarlı Karbon

Nanotüp(SWCNT),

Çift Duvarlı Karbon Nanotüp(DWCNT), Üç Duvarlı Karbon Nanotüp(TWCNT) ve Çok Duvarlı Karbon Nanotüp(MWCNT) olabilirler. Bu da onları farklı uygulamalar için çekici kılar. Nanotakviyeli polimer kompozitler farklı üretim teknikleri ile elde edilebilir. Bunlardan en yaygın olanı nanotakviyeleri polimer matrise doğrudan karıştırmaktır. Diğer üretim yöntemleri ise elektrospinning, elektrofilament yöntemi, vakum infüzyonu, ısıt işlem, ekstrüzyon ve enjeksiyon kalıplamadır. Kullanılan özel işlem, malzemenin nihai özelliklerini etkileyebilir. Nanotakviyeli kompozit polimerlerde kullanılan takviye edici parçacıklar, metaller, seramikler ve polimerler dahil olmak üzere çeşitli malzemelerden yapılabilir. Bu parçacıkların boyutu tipik olarak 100 nanometreden (nm) küçük boyutlara sahiptir. Küçük boyutları nedeniyle, bu parçacıklar, muadillerinden farklı benzersiz fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip olabilir. Örneğin, nanoparçacıkların yüksek yüzey alanı, polimer matris ile artan arayüzey etkileşimlerine izin vererek, geliştirilmiş mekanik mukavemet ve tokluk sağlar. Nano takviyeli kompozit polimerler, havacılık, otomotiv, elektronik ve biyomedikal endüstrileri dahil olmak üzere çok çeşitli potansiyel uygulamalara sahiptir. Örnek verecek olursak uçak ve uzay araçlarında kullanılmak üzere hafif, yüksek mukavemetli malzemeler oluşturmak veya gelişmiş biyouyumluluk ve mekanik özelliklere sahip tıbbi implantlar geliştirmek için kullanılabilirler. Taşımacılık sektöründe ağırlık ve maliyet doğru orantılı olduğu için son yıllarda nanotakviyeli polimer kompozit üretimi bu alanda artmıştır.



Şekil 2.1 Karbon Nanotüplerin Çeşitleri (İnt.Kyn.2).

2.1.2 Karbon Nanotüpler

Karbon nanotüpler, benzersiz elektronik ve mekanik özelliklere sahip silindirik karbon yapılarıdır. Karbon atomlarının iki boyutlu altıgen bir kafesi olan tek bir katmandan veya çok sayıda grafen katmanından oluşurlar. CNT'ler tek duvarlı veya çok duvarlı olabilir, ikincisi çoklu eşmerkezli silindirlerden oluşur.

CNT'ler, tipik uzunluk-çap oranı 1000:1 veya daha fazla olan yüksek bir en-boy oranına sahiptir. Bu, onlara yüksek mukavemet, sağlamlık ve esneklik dahil olmak üzere benzersiz mekanik özellikler verir. Aynı zamanda mükemmel elektriksel iletkenliğe ve termal iletkenliğe sahiptirler, bu da onları çok çeşitli elektronik ve termal uygulamalarda kullanım için umut verici adaylar yapar. CNT'lere farklı üretim yöntemleriyle ulaşmak mümkündür. En yaygın yöntemler Kimyasal buhar biriktirme, ark deşarjı ve lazer ablasyonudur.

Kimyasal Buhar Biriktirme

Bir karbon kaynağı gazı (genellikle metan veya etilen) bir substrata geçirilir ve daha sonra bu gaz üzerine bir metal katalizör uygulanır. Yüksek sıcaklıkta buharlaşan karbon gazı, metal katalizörün yüzeyinde toplanır ve CNT'leri oluşturmak için reaksiyona girer.

Ark Deşarjı

Bu yöntemde, iki karbon elektrot arasına yüksek voltaj uygulanır. Elektrotların arasındaki hava boşluğunda oluşan plazma, karbon atomlarını serbest bırakır ve CNT'leri oluşturmak için reaksiyona girer.

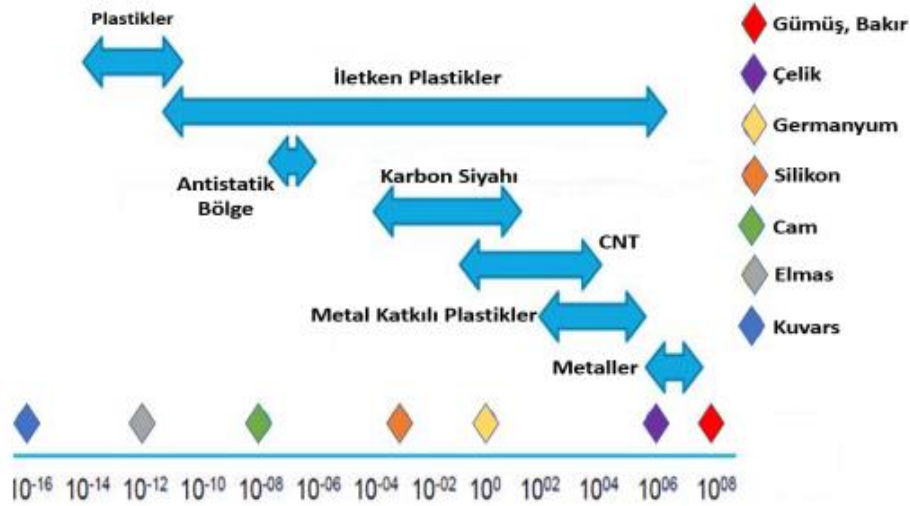
Lazer Ablasyonu

Bu yöntemde, bir karbon hedefi lazer ile bombardıman edilir ve hedefin yüzeyinden kopan karbon atomları, CNT'leri oluşturmak için reaksiyona girer.

Bu yöntemlerin kendi içlerinde avantaj ve dezavantajları vardır. Örnek vermek gerekirse Kimyasal buhar biriktirme yönteminde büyük ölçekli üretim yapılabilirken diğer yöntemlerde daha küçük ölçekli üretimler yapılabilmektedir.

Tüm bu özelliklerinden dolayı CNT ve CNT-PMK'ler yüksek dayanım ve düşük ağırlık gerektiren uygulamalarda hafif metal alaşımlarının yerini almaya başlamıştır. CNT'lerin elektronik özellikleri çaplarına, uzunluklarına ve kiralitelerine bağlıdır. Bu parametrelere bağlı olarak, CNT'ler metaller veya yarı iletkenler gibi davranabilir. Metalik CNT'ler, elektriği çok verimli bir şekilde iletmelerine izin veren Fermi seviyesinde yüksek bir hal yoğunluğuna sahiptir. Yarı iletken CNT'ler ise çapları ve kiraliteleri değiştirilerek ayarlanabilen bir bant aralığına sahiptir, bu da onları elektronik ve optoelektronik uygulamalar için uygun hale getirir. Ortaya çıkan malzeme, elektronik özelliklerinden tam olarak yararlanmak için ayrılmaları gereken metalik ve yarı iletken CNT'lerin bir karışımı olabilir. CNT'leri elektronik tiplerine göre sıralamak için yoğunluk gradyanlı ultrasantrifüjleme, jel elektroforezi ve kromatografi dahil olmak üzere çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Üretim yöntemlerine göre iletkenlikleri değişen malzemelerde tüp boyunca iyi iletkenlik sağlansa da tüp eksenine yanlamasında yalıtkan özellik gösterirler. Bu iletkenliklerin önem arz edenleri elektriksel iletkenlik ve termal iletkenliktir. Birçok fiberle uyum gösterdiği ve maliyeti düşük olduğu için matris olarak en çok kullanılan epoksi polimerler, amorf ve çapraz bağlı yapısı; yüksek modül, yüksek hasar dayanımı, düşük sürünme, yüksek sıcaklıklarda yapısını koruyabilme gibi avantajlar sağlamaktadır. Genel olarak, nano takviyeli kompozit polimerlerin benzersiz özellikleri, onları malzeme bilimi ve mühendisliğinde heyecan verici bir araştırma ve geliştirme alanı haline getiriyor. Fakat epoksilerin elektriksel iletkenliği çok düşük olduğu için bazı engeller ortaya çıkıyor. Bu durumda iletkenliği olağan üstü olan karbon fiberler ile birleşince bile kalınlık doğrultusunda istenilen elektrik iletkenliğini veremezler. Polimerlere elektrik iletkenliğinin kazandırılmasında kullanılan CNT (Karbon Nanotüp) elektrik iletkenliği ise $1-10^4$ S/m aralığındadır. Polimerlerin elektrik

iletkenliği 10^{-16} - 10^{-14} S/m aralığında değişmektedir. Elektrik iletkenliği ve elektrik direnci birbirlerinin zıttı olan tanımlardır ve ters orantılıdır (Karabacak vd. 2022). Termal iletkenlikleri ise literatürde x, y ve z doğrultusunda sırayla 11,8; 0,6 ve 0,6 şeklinde verilmiştir (Ogasawara vd. 2010).



Şekil 2.2 Metal olan ve metal olmayan malzemelerin elektrik iletkenliği (Karabacak vd. 2022).

2.1.3 Nanokiller

Nanokiller, yüksek en boy oranına ve geniş yüzey alanına sahip nanopartiküller oluşturmak için işlenmiş kil mineralleridir. Nanokiller, polimer kompozitlerde mekanik, termal ve bariyer özelliklerini iyileştirmek için yaygın olarak dolgu maddesi veya takviye olarak kullanılır. Nanokillerin eklenmesi, polimer kompozitlerin mukavemetini, sertliğini ve termal kararlılığını artırarak onları çok çeşitli uygulamalarda kullanıma uygun hale getirebilir. Bir polimer matrisine dahil edildiğinde, nanokil partikülleri, kompozit malzemenin mekanik özelliklerini geliştiren polimer zincirleri ile güçlü bir arayüzey oluşturabilir. Spesifik olarak bir polimer matrise nanokil eklentisi yapılması kompozit malzemenin mukavemetini ve sertliğini artırmanın yanı sıra kırılma tokluğu ve darbeye karşı direncini de artırır. Bunun nedeni nanokillerin polimer matrisi güçlendirmesi ve çatlak ilerlemesine karşı bir bariyer oluşturmasıdır. Nanokiller kaplama ve boya alanında kullanımında ise mekanik özellikleri iyileştirmenin yanı sıra yanıcılıklarını azaltmak, suya ve diğer çevresel faktörlere karşı dirençlerini artırmak için

katkı maddesi olarak kullanılır. Ambalaj sanayisinde ise bariyerleme özelliğini kullanarak oksijen ve diğer gazlardan ambalajlar yoluyla bozunumunu engellemek, bu sayede gıdanın raf ömrünü uzatmak için sıklıkla kullanılmaktadır. İnşaat sanayisinde mukavemet ve dayanıklılık gibi mekanik özelliklerini kullanarak çimento ve betonda katkı malzemesi olarak kullanılır.

Nanokil ilaveli kompozit malzemelerin gelişmiş özellikleri onları havacılık, uzay ve otomotiv gibi sektörlerde de kullanılabilir hale getirebilir. Nanokil takviyeli kompozitlerin gücü, kullanılan nanokilin türü ve konsantrasyonu, işleme koşulları ve polimer matrisin özellikleri dahil olmak üzere çeşitli faktörlere bağlı olabilir. Araştırmacılar, mukavemetlerini ve diğer arzu edilen özelliklerini en üst düzeye çıkarmak için kompozit malzemelerde nanokillerin kullanımını incelemeye ve optimize etmeye devam ediyor.

2.1.4 Disperse Ajanları

Disperse ajanlarının genel kullanım alanları katı ve sıvı malzemelerin birbirine karışmasını sağlamaktır. Bu kimyasal bileşikler heterojen karışımların homojen bir sisteme dönüşmesini sağlar.

Disperse ajanlarının bazı özellikleri şunlardır:

1. Yüzey gerilimi azaltma: Disperse ajanlar, yüzey gerilimini azaltarak, farklı fazların birbirlerine daha iyi karışmasını sağlar.
2. Stabilizasyon: Bazı disperse ajanlar, etkileşen maddeler arasındaki çökeltme veya ayrışmayı önleyerek, karışımın stabil hale gelmesine yardımcı olur.
3. Emülsiyon: Sıvı/ sıvı karışımlarında emülsiyon oluşumunu artırır.
4. Dağıtım: Katı partiküllerin sıvı içinde dağılımını iyileştirir.

Disperse ajanları boyalar, kozmetik sanayi, ilaç ve polimer malzemeler gibi birçok endüstriyel alanda kullanılır. Polimer alanında nanopartiküllerin malzeme içerisinde dağılımını homojenize etmek için kullanıldığı görülmüştür. Disperse ajanlara örnek olarak SDS(Sodyum Dodecil Sulfat), PEG(Polietilen Glikol), Silanlar, Triton X-100 , Tween 80, DMPA(Dimetiloldi-Hidroksi Propil Amonyum Nitrat) örnek verilebilir. Silanlar, PEG ve Triton X-100 polimerik olarak kullanımı öne çıkan disperse ajanlarıdır. Polimer alanında kullanılan disperse ajanları düşük toksisite, yüksek

etkinlik, stabilite ve çevre dostu olması avantajlarına sahiptir.

2.1.4.1 Silanlar

Bu bilgiler doğrultusunda nanotakviyeli polimer kompozit üretiminde iletkenlik özelliklerini değiştirmek adına yapılan çalışmalarda Silan molekülleri üretime dahil edilerek daha yararlı bir malzeme üretimi için çalışmalara başlanmıştır. Silanlar çeşitli yüzeylerle güçlü bağlanma ve özellikleri değiştirme konusundaki yeteneklerinden dolayı birçok sektörde kullanılmıştır. Bunlara örnek verecek olursak güçlü yapışma özelliklerinden dolayı kaplamaların, yapıştırıcıların ve sızdırmazlık özellikleri istenen malzemelerin metal, cam, seramik ve polimerlerin çeşitli yüzeylere yapışmasını iyileştirmek için kullanılmıştır. Yüzey özelliklerini iyileştirme açısından malzemenin hidrofobikliği veya hidrofillikliği gibi özelliklerini değiştirmek için kullanılmıştır. Korozyon tarafından baktığımızda silanlar metalleri neme veya çevresel faktörlere karşı korumak için korozyon önleyici olarak kullanılmıştır. Biyomedikal alanında implantların ve protezlerin vücut tarafından reddedilme durumunu azaltmak için malzemelerin yüzey özelliklerini değiştirip, biyouyumluluklarını iyileştirmek için kullanılmıştır. Bu çalışmaya katkısına bakıldığında nanoparçacık sentezinde ise silanlar, nanoparçacıkların boyutlarını, şekillerini ve kararlılıklarını kontrol etmek için kullanılmaktadır. Günümüzde Silanlar ve CNT'lerin birçok çalışmada bir arada kullanıldığını görmekteyiz. Bunun en spesifik nedeni benzersiz mekanik, elektriksel ve termal özelliklere sahip CNT'lerin yüksek en boy oranına ve düşük yüzey alanına sahip olmalarıdır. Bu özellikler homojen olarak dağılmalarını ve diğer malzemelere bağlanmalarını zorlaştırır. Tam bu noktada Silanlar, CNT'lerin yüzey özelliklerini işlevsel hale getirip bunları polimer veya metal matrisli kompozitlerde dağılımı iyileştirmek için kullanılmıştır. Bu işleme aşılama adı verilmiştir. CNT'lerin yüzeyine fonksiyonel grupları kovalent olarak bağlamak için silanlar kullanılabilir, bu da onların elektronik yapılarını değiştirebilir ve elektriksel iletkenliklerini artırır. Silan işlevli CNT'ler ise polimer matris arasındaki yapışmayı iyileştirerek daha güçlü bir kompozit

elde edilmesine yardımcı olur. Çalışmaların iletkenlik boyutunda ise dolgu maddesi olarak kullanılan CNT'ler silan ile beraber kaplamadaki dağılımı iyileştirir ve topaklanmayı azaltır. Genel olarak, CNT'lerin yüzeylerini değiştirmek için silanların kullanılması, elektriksel iletkenliklerini arttırmak ve çeşitli elektronik uygulamalarda kullanımlarını sağlamak için umut verici bir yaklaşımı gösterir. Silanlarla işlevselleştirmeye ek olarak, CNT'lerin elektriksel iletkenliğini artırmak için başka yöntemler geliştirilmiştir. Örneğin, nanokiller gibi yabancı atomlar veya moleküllerle destekleyebilir, yük taşıyıcıları CNT'lere sokabilir ve elektriksel iletkenliklerini artırabilir. Bu sayede CNT'ler ve nanokiller mukavemet, sertlik ve iletkenlik gibi özellikleri geliştirmek amacıyla polimer kompozitlerde nanotakviye olarak kullanılır. Bu çalışmada ise bir amino silan bağlayıcı olan Lavidasil™ AN 112 AS(N-(2-Aminoethyl-3-aminopropyl)trimethoxysilane) kullanılmıştır. Bu polimer dispersiyon ajanı ıslatma ve dispersiyon katkısı olarak organik pigmentler, inorganik dolgu maddeleri, inorganik pigmentler, talk, titanyum dioksit ve demir oksit gibi ürünlerin reçetelerinde kullanılır.

2.1.4.2 Triton X-100

Triton X-100, yüzey aktif özellik gösteren bir polimer disperjan ajandır. Noniyonik bir bileşik olan Triton X-100, sulu çözeltilerde yüksek miktarda çözünürlüğe sahiptir. Triton X-100, çeşitli endüstriyel uygulamalarda da kullanılır ve özellikle boyaların ve mürekkeplerin formülasyonunda yaygın olarak kullanılmaktadır. Triton X-100, yüksek stabilitesi nedeniyle de tercih edilen bir ajandır, ısı, asitler, bazlar ve oksitleyici ajanlar gibi birçok kimyasal maddeden etkilenmez.

Çizelge 2.2 Karbon nanotüplerin ve nanokillerin karşılaştırılması.

Özellikler	Karbon Nanotüpler	Nanokil
Tanım	Grafen tabakalarının tüp şeklinde bükülmesi sonucu oluşan karbon yapılar	İnce taneli minerallerden, çoğunlukla filosilikatlı minerallerden ve mineraller arasında kalan değişken su miktarından oluşan doğal olarak oluşan bir malzemedir.
Boyut	Çapı nanometre düzeyinde, uzunluğu mikrometrelerle ifade edilir	Çapı genellikle 1-100 nanometre arasındadır, uzunluğu ise değişebilir
Morfoloji	Silindirik veya kafes şeklinde	Yassı, levha şeklinde
Elektriksel Özellikleri	Yüksek elektrik iletkenliği ve yarıiletken özellikleri vardır	Elektriksel iletkenlikleri düşüktür
Kimyasal Dayanıklılık	Kimyasal olarak dayanıklıdır	Kimyasal olarak daha az dayanıklıdır
Mekanik Dayanıklılık	Son derece yüksek mekanik dayanıklılığa sahiptir	Daha az mekanik dayanıklılığa sahiptir
Uygulamalar	Elektronik, nanoteknoloji, malzeme bilimi, ilaç teslimatı	Kataliz, adsorpsiyon, gıda endüstrisi, petrol endüstrisi

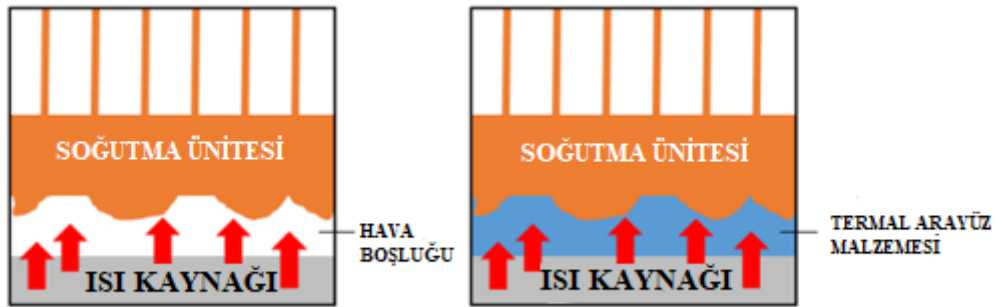
2.1.5 Hibridizasyon Etkisi

Bu çalışmada CNT/Epoksi kompozit malzemesinin içerisine nanokil eklentisi yapılarak, nanokilin malzemede ki mekanik özellikleri, termal ve elektriksel iletkenliğine etkilerini araştırırken, malzemenin içerisine disperse ajanları katılarak sonuçlar gözlenmiştir. Çizelge 2.2’de görüldüğü üzere nanokil parçacıkları genel olarak yüksek yüzey alanı, yüksek en boy oranı ve polimer matrislerle güçlü arayüzey bağlantıları oluşturma gibi özellikler kazandıran plaka benzeri parçacıkların istiflenmiş katmanlarından oluşur. Nanokiller bir polimer matrise eklendiğinde elde edilen malzemenin mukavemet, iletkenlik, tokluk, sertlik ve yorulma dayanımı gibi mekanik özellikleri yüksek derecede

artar. Bunun nedeni nanokil parçalarının deformasyon direnci olan ve çatlak ilerlemesine karşı birbirine bağlı bir ağ oluşturarak polimer matrisini güçlendirmesidir. Nanokil takviyesi, kompozit malzemelerin termal ve bariyer özelliklerini de geliştirebilir. Nanokil parçacıklarının yüksek yüzey alanı, gazlar ve sıvılar için malzemenin bariyer özelliklerini geliştirebilen dolambaçlı bir yol oluşturabilir. Ek olarak, nanokil parçacıklarının varlığı, polimer zincirlerinin hareketliliğini azaltarak ve termal bozunmayı önleyerek malzemenin termal kararlılığını artırabilir. Nanokiller ve CNT'ler farklı malzemeler olsa da gelişmiş bir hibrit malzeme oluşturmak için kompozit malzemelerde bir arada kullanılabilir. Bu çalışmada da olduğu gibi bir kompozit malzemenin polimer matrisini güçlendirmek için nanokiller kullanılırken, elektriksel iletkenliğini artırmak için CNT'ler eklenebilir. Yüksek elektrik iletkenliğine sahip CNT'ler matriste kullanılırken nanokil parçacıkları kompozit malzemenin CNT ve polimer matris arasındaki arayüzey bağını geliştirir. Kompozit malzemelerde nanokil ve CNT kombinasyonu yüksek performanslı malzeme üretiminde geniş bir alana sahiptir.

3. LİTERATÜR BİLGİLERİ

Karbon nanotüp ve nanokil takviyeli PMK'ler, son yıllarda malzeme biliminde büyük ilgi görmüştür. Bu kompozitler, polimer matrisine eklenen küçük boyutta karbon nanotüp veya nanokil gibi takviye malzemeleri ile güçlendirilirler. Karbon nanotüplerin benzersiz mekanik ve elektriksel özellikleri, PMK'lerin mekanik dayanıklılığını artırırken aynı zamanda elektriksel iletkenliği de arttırabilir. Nanokil bileşeni ise polimer matrisindeki moleküler yapıyı değiştirerek, kompozitin mekanik özelliklerinin geliştirilmesine yardımcı olur. Karbon nanotüp takviyeli PMK'ler, yüksek mukavemet, düşük yoğunluk ve iyi termal kararlılık gibi üstün özellikler sergiler. Bu nedenle, havacılık, uzay ve otomotiv endüstrilerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Nanokil takviyeli PMK'ler ise çevre dostu ve düşük maliyetli bir malzeme seçeneği olarak önem kazanmaktadır(Florez vd. 2016). Hafifliği, korozyon direnci, maliyet verimliliği ve ayarlanabilir mekanik ve termal özellikleri ile PMK'ler, yeni nesil termal arayüz malzemeleri için alternatif bir çözüm sunar. Termal yönetim uygulamalarının asıl amaçlarından bir tanesi de ısıyı dağıtarak elektronik cihazların optimum ısıda kalmasını sağlamaktadır. Bir cihazı soğuk tutmak için gerekli olan şey ısının kaynağı ile ısı emici yüzey arasında hava boşluğu kalmamasıdır, çünkü hava düşük termal iletkenliğe sahiptir. Bu nedenle ısı kaynağı ve ısı emici yüzey arasındaki temas alanı mümkün olduğunca artırılmalıdır(Due vd. 2013). Termal arayüz maddelerinin önemi Şekil 3.1'de gösterilmiştir.



Şekil 3.1 Hava boşluğunu doldurmak için uygulanan termal arayüz malzemeler (Due vd. 2013).

Tek duvarlı karbon nanotüpü epoksi/karbon fiber tabakalı kompozitlerde kullanmış ve

mekaniksel özelliklerini incelemişlerdir. Yaptıkları testlerde epoksinin ağırlıkça %0.1 tek duvarlı karbon nanotüp kullanıp, darbeden sonra sıkıştırma (Compression After Impact, CAI) testinde %3.5, kırılma tokluğunda %13, tabakalar arası kırılma tokluğunda %28'lik artış gözlenirken; darbe hasarında %5 azalma elde etmişlerdir(Ashrafi vd. 2011). Karbon nanotüpler yüksek mukavemet, yüksek iletkenlik ve düşük yoğunluk gibi birçok üstün özelliklere sahip nano ölçekli malzemelerdir. Bu özellikler, CNT'lerin birçok farklı alanda kullanımı için potansiyel sağlar. Bunlardan biri, elektriksel iletkenliğin artırılması için epoksi polimerlere CNT'lerin eklenmesidir. CNT'lerin epoksi polimerlere eklenmesi, kompozitin elektriksel iletkenliğini önemli ölçüde arttırabilir. CNT'lerin epoksi polimerlere eklenmesi ile kompozitin elektriksel iletkenliğini arttırmanın en etkili yollarından biri, CNT'lerin kompozit içinde doğru bir şekilde yönlendirilmesidir. CNT'lerin doğru bir şekilde yönlendirilmesi, kompozit içinde elektriksel yollar oluşturarak elektronların daha kolay hareket etmesini sağlar. CNT'lerin yönlendirilmesi, çeşitli yöntemlerle yapılabilir. Bunlardan en yaygın yöntemler, mekanik ekstrüzyon, kimyasal enjeksiyon ve elektromanyetik yönlendirilmedir(Dai vd. 2005). Ayrıca, CNT'lerin yüzey fonksiyonelleştirilmesinin kompozitin elektriksel özelliklerine etkisi de incelenmiştir. Sonuçlar, CNT'lerin yüksek iletkenlik özelliğine rağmen, uygun bir şekilde hizalanmadıklarında kompozitin iletkenliğinin düşebileceğini ve bu nedenle CNT hizalamasının önemli olduğunu göstermektedir. Ayrıca, yüzey fonksiyonelleştirme işlemlerinin, CNT'lerin kompozitteki dağılımını ve iletkenliğini etkilediği görülmüştür. CNT'lerin yüksek iletkenlik özellikleri bilinirken yarı iletkenlik halleri araştırılmıştır. Tek duvarlı ve çok duvarlı CNT'lerin elektriksel karakterizasyonu yapılırken direnç-gerilim(R-V) eğrileri ölçülmüş ve bu eğrilerden elektriksel özellikler çıkarılmıştır. Yarıiletkenlik özellikleri Raman spektroskopisi ve fotoluminesans ölçümleri yapılarak incelenmiştir. Tek bir CNT'nin R-V eğrisi, tipik olarak lineer olup, CNT'nin metalik veya yarıiletken olduğunu gösterir. Örneğin, 1.6 μm uzunluğundaki bir CNT'nin R-V eğrisi, 0.054 $\text{k}\Omega/\mu\text{m}$ eğimle başlayarak 3.67 $\text{k}\Omega$ dirence ulaşmaktadır. Çoklu CNT'lerin R-V eğrilerinde ise farklı davranışlar görülebilir. Örneğin, bazı çoklu CNT'lerde R-V eğrisi lineer iken, bazılarında eğrisel bir davranış görülmektedir. Bazı çoklu CNT'lerde ise birden fazla iletkenlik davranışı gözlemlenmiştir(Baughman vd. 2002). Siddiqui vd. (2009), epoksi matrise CNT ekleyip, bu matrisi CFRP kompozitte kullanmışlardır. Yaptıkları ILSS

testlerinde ağırlıkça % 0.5 CNT takviyesiyle % 12 artış gözlemlemişlerdir. Tüp şeklinde içi boş olan numunelerle yaptıkları burulma modülü ve mukavemeti testlerinde sırasıyla %17 ve % 19.5 iyileşme tespit etmişlerdir. Bunun yanı sıra ağırlıkça % 0.5'den fazla CNT içerik içeren testlerde bu iyileşmelerin düştüğünü gözlemlemişler bunu da CNT içeriğinin bölgesel olarak toplanmasına bağlamışlardır. Ming vd. (2007) silan ile modifiye edilmiş MWNT/PMMA(Polimetil Metakrilat) kompozitlerini hazırlayarak bunun elektrik direncini, termal iletkenlik ve kararlılığını araştırmışlardır. Öncelikle MWCNT, 3-izosiyanat trietoksilan ile modifiye edilmiş metil metakrilat (MMA) ve viniltrioksilan (VTES) ile PMMA-VTES den çapraz bağlı PMMA-VTES hazırlayarak sonrasında Si-MWNT ile kompozitini oluşturmuşlar. SEM ve TEM görüntülerinden polimer matrix içine iyi dağıtıldığını söylemişlerdir. Yüzey ve hacim elektrik direnci MWCNT arttıkça azaldığını belirtmişlerdir. Termal iletkenliğini ise PMMA-VTES içine düzenli şekilde ağırlıkça % 0,99 Si-MWNT eklendiğinde %87,5 artmıştır. Termal kararlılığında ise hava ve azotta küçük bir miktarı (ağırlıkça %0,5) Si-MWNT eklendiğinde bile arttığını söylemişlerdir. Zhao vd. (2018), PMK'lerin elektriksel iletkenliğinin CNT'lerin eklenmesiyle altı büyüklük sırasına kadar arttığını bildirdi. Hu vd. (2015), CNT ve grafenlerin epoksi kompozit malzemelerde elektriksel iletkenliğe etkilerini araştırmışlardır. CNT ve grafenleri ultrasonik banyoda disperse ederek epoksi matrisli kompozitlerin içerisine ağırlıkça farklı oranlarda koyulmuştur. Sonrasında epoksi ve sertleştirici eklenerek sürekli karıştırma ile homojen bir karışım elde edilip kalıplara dökülmüş ve oda sıcaklığında kürlenmeye bırakılmıştır. LCR metre ve SEM analiz cihazlarından alınan sonuçlara göre CNT ve grafeninde kompozitin elektrik iletkenliğini artırdığı fakat CNT'lerin grafenlere göre malzemeye daha fazla iletkenlik kattığı, homojen dağıldığı ve epoksi matrisli kompozit malzemeler için daha uygun bir iletken dolgu maddesi olduğu gözlenmiştir. Esen (2018), polimer tabanlı kompozitlerde grafen nanoplateletlerinin elektriksel iletkenliği üzerine etkisini araştırmıştır. Farklı konsantrasyonlarda grafen nanoplateletleri kullanarak, bu malzemelerin elektriksel iletkenlik özellikleri incelenmiştir. Örnek hazırlama aşamasında, polimer matris ve grafen nanoplateletleri uygun oranlarda karıştırılmış ve sonrasında çeşitli kalıplar kullanılarak şekillendirilmiştir. Örnekler daha sonra termal işlem veya diğer yöntemlerle sertleştirildi. Örneklerin karakterizasyonu, taramalı elektron mikroskobu (SEM), geçirimli elektron mikroskobu (TEM), X-ışını

difraksiyonu (XRD) ve termal analiz gibi teknikler kullanılarak gerçekleştirildi. Ölçümler ise elektriksel iletkenlik, direnç, ısıya bağlı iletkenlik ve mekanik özellikler gibi parametreleri değerlendirmek için yapılmıştır. Sonuç olarak, bu çalışma grafen nanoplateletlerinin elektriksel iletkenliği arttırdığını ve polimer tabanlı kompozit malzemelerin gelecekte birçok endüstriyel uygulamada kullanılabilecek gelişmiş özelliklere sahip olabileceğini göstermektedir. Hibridizasyon etkisi, daha da fazla termal iletkenlik elde etmek için iki veya daha fazla farklı dolgu maddesinin bir kombinasyonu olarak tanımlanabilir(Mehra 2018). Bugüne kadar, termal olarak iletken kompozit üretimi için yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE), PP, PPS, PEI ve polieter eter keton (PEEK) gibi çeşitli polimerler kullanılmıştır. HDPE matrisine dahil edilen BN ve CNT dolgu maddelerini kullanarak termal iletkenlik üzerindeki hibridizasyon etkisini araştırdı. Çalışma, farklı boyut ve tipte dolgu maddelerinin kullanılmasının ısı iletkenlik üzerinde çok büyük bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Ağırlıkça %25 BN ve ağırlıkça %3 CNT kullanılması termal iletkenlikte %300 artışa yol açtı. Ancak yukarıda belirtilen dolgu konsantrasyonları ile istenilen ısı iletkenlik değerlerine ulaşılamamıştır. Bu doğrusal olmayan termal iletkenlik davranışı, termal iletkenlik yolunun oluşmamasındandır(Che vd. 2018). Yapılan başka bir çalışmada, PEI matrisi CNT'ler ve AlN ile doldurulmuştur. Elde ettikleri sonuçlar, kompozitin termal iletkenliğinin önemli ölçüde %670 arttığını ve dolgu yükü ağırlıkça %80 AlN ve ağırlıkça %5 CNT'de 1.62 W/mK'ye ulaştığını göstermiştir(Wu vd. 2011). PMK'ların termal iletkenliği, daha önce bahsedildiği gibi esasen içsel termal iletkenliğe ve dolgu maddelerinin dağılma durumuna bağlıdır. Bir diğer önemli nokta ise; Kompozitin termal iletkenliğini etkileyen dolgu maddesinin boyutudur. Polimer matris ile dolgu maddesi arasındaki arayüz, PMK'lerin termal iletkenliğinde önemli bir role sahiptir ve PMK'lerde istenen termal iletkenliğin sağlanamamasının ana nedeni, polimer matris ile dolgu maddesi arasındaki arayüz direncidir. Matris dolgu arabirimi, dolgu boyutuna bağlı olarak değişebilir. Literatürde dolgu maddesinin boyut etkisini anlamak için çeşitli çalışmalar yapılmıştır(Shin vd. 2013). Literatürde, PMK'lere tek duvarlı ve çok duvarlı karbon nanotüplerin katkısı ile elektriksel ve termal iletkenlikleri, mekanik davranışlarının geliştirilmesi üzerine birçok çalışma mevcuttur. Bunların yanı sıra PMK'lere hibridizasyon etkisi(Bor Nitrür) ile daha fazla nano katkı eklenerek termal iletkenliği geliştirmeye yönelik çalışmalarda mevcuttur. Bu çalışmada PMK malzeme

içerisine karbon nanotüp ve disperse ajanı eklenerek numunelerin elektriksel iletkenlikleri llm, sem görüntüleri ve termal analizleri literatürdeki gibi detaylı bir şekilde incelenmiştir. Fakat, literatürden farklı olarak PMK içerisine karbon nanotüp eklentisi ağırlıkça farklı oranlarda disperse ajanı ile beraber yapılmıştır. Farklı oranlardaki disperse ajanlarının homojenliēe etkisi aratırılmı olup bu etkinin termal ve elektriksel iletkenliēe etkisi ise detaylı bir şekilde incelenmiştir. Karbon nanotüp ve nanokil ise PMK içerisine farklı oranlarda katılarak elektriksel ve termal iletkenlikleri karılatırılmıtır.



4. MATERYAL ve METOD

4.1 Materyal

Verpol markasına ait RTV-2710 model kalıp silikonu ile önceden aynı boyutlarda kestirilmiş metaller kullanılarak kalıp yapılmıştır. Bu kalıp silikonunun kullanılma nedenlerinden öne çıkanı su, asit, bazlar, solvent ve diğer kimyasallar ile tepkimeye girmeyiştir. Yüksek sıcaklığa dayanıklı ve kürlenme süresi oldukça hızlıdır. Yaklaşık olarak 4-6 saat aralıklarında oda sıcaklığında kürlenme işlemi tamamlanır. Önemli diğer özelliklerinden bir tanesi de pürüzsüz yüzeylerin üretimi için uygun oluşudur.



Resim 4.1 RTV-2710 Kalıp silikonu.

RAKU-TOOL AC-9102 kalıpların yüzeyinde ince bir film oluşturarak, kalıp ile ayrılacak malzeme arasında bir ayrım sağlar. Kalıp üzerinde minimum kalıntı bırakarak kalıbın kolay temizlenmesini sağlar. Özellikle poliüretan ve epoksi reçinelerin kalıplardan kolayca ve zarar görmeden çıkması için üretilmiştir.



Resim 4.2 RAKU-TOOL AC-9102 kalıp yağlayıcı.

Karbon nanotüpleri ve nanokili homojenize bir biçimde karıştırmak için %99.9 saf izopropil alkol kullanılmıştır. İPA'nın kullanılmasının diğer bir nedeni ise uçucu bir sıvı olduğu için karışımdan uzaklaşabilmesidir, 82.6°C'de kaynamaktadır. İPA düşük viskoziteli olduğu için ultrasonik karıştırma için uygundur. Bu çalışmada Wogens marka %99.9 İPA kullanılmıştır.



Resim 4.3 Wogens %99.9 saflıkta izopropil alkol.

Nanokil ve nanotüp gibi nano boyuttaki malzemeleri homojen bir şekilde karıştırmak için kullanılan uygun yöntemlerden bir tanesi ultrasonik karıştırıcıdır. Bu yöntemin kullanılmasındaki asıl amaç sıvıyı yüksek frekanslı titreşimlere maruz bırakarak

içerisindeki malzemeleri homojen biçimde karıştırmaktır. Uygulama yapılırken yüksek ultrasonik titreşimlerin malzemeleri bozmasını önlemek adına homojenizatör 5 saniye çalıştırılıp 5 saniye beklenmiştir. Bu çalışmada Nanografi marka ultrasonik homojenizatör kullanılmıştır.



Resim 4.4 Nanografi ultrasonik homojenizatör (İnt.Kyn.3).

Çizelge 4.1 Nanografi ultrasonik homojenizatör teknik özellikleri

Frekans (Khz)	20
Güç (W)	500
Elektrik Üretimi	AC 220V 50/60 Hz
Çalışma Sırası	10-500 mL volumes
Uzunluk/Genişlik/Derinlik (cm)	22/19/33
Prob	Titanyum alaşımı (5.6mm Ø ve 60mm uzunluk)
Aparat	Gürültü Önleyici Kabin

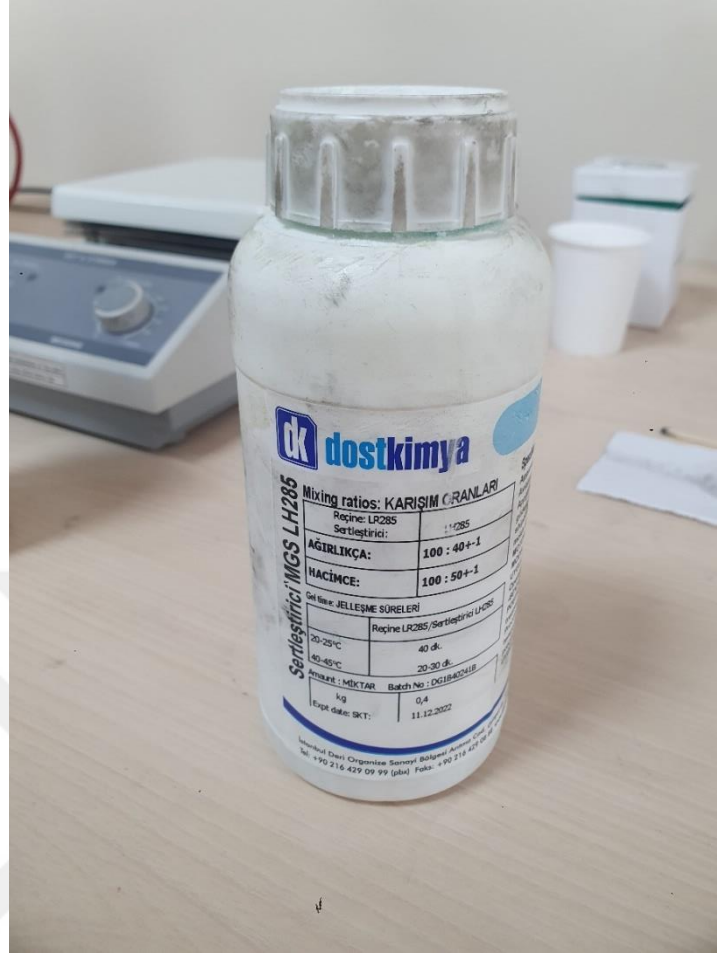
Manyetik karıştırıcı olarak MTOPS markasının Ms300 Hs modeli kullanılmıştır. Bu modelin kullanılmasındaki en büyük etken numune içerisinde kalan İPA'nın sıcaklık etkisi ile daha verimli bir şekilde uzaklaştırılmasıdır. Tablası seramik kaplı alüminyum

malzemedir. Maksimum 380°C sıcaklığa ve 1500 rpm dönüş hızına ulaşabilmektedir.



Resim 4.5 MTOPS MS300HS ısıtıcılı manyetik karıştırıcı.

Matris ve takviye malzemelerin özellikleri aşağıda Çizelge 4.2 ve Çizelge 4.3’de belirtilmiş ve üreticinin katalog değerlerine yer verilmiştir. Bu çalışmada matris olarak kullanılan epoksi Dost Kimya marka MGS(Maleic Glycidyl Ether) LR285 reçine olup viskozitesi 600-900 mPas ve sertleştirici olarak Dost Kimya marka MGS LH285’in ise 50-100 mPas viskozite değeri bulunmaktadır. Bu reçinenin seçilmesinin etkenleri kimyasal direncinin yüksek olması, yüksek mukavemet sağlaması, çizilmeye karşı dayanıklı olması, adhezyon kuvvetinin iyi olması ve farklı yüzeylere yüksek yapışma sağlaması ve kolay işlenebilme ve kolay şekillendirilme özelliklerine sahip olmasıdır.



Resim 4.7 MGS LH 285-286-287 sertleştirici.

Çizelge 4.3 MGS LH 285-286-287 sertleştirici özellikleri (İnt.Kyn.4).

Özellikler / Sertleştirici	H285	H286	H286
Yoğunluk (g/cm ³)	0.94 - 0,97	0.94 - 0,97	0,93 - 0,96
Viskozite (mPas)	50 - 100	60 - 100	80 - 120
Amin Değeri (mgr KOH/gr)	480 - 550	450 - 500	450 - 500
Refratör indeksi	1,5020 - 1,5500	1,4995 - 1,5100	1,4950 - 1,4990
Ölçüm Şartları	25°C	25°C	25°C

Çalışmanın temelinde yatan elektrik iletkenliğinin artırılması için CNT'ler kullanılmıştır. Bu çalışmada Nanografi markasına ait -COOH ile iyonelleştirilmiş yüksek saflıkta karbon nanotüpler kullanılmıştır. Fonksiyonelleştirilmiş CNT kullanılmasının amacı yüzey özelliklerinin daha iyi olmasıdır. Kullanılan CNT'lerin boyutu 8-18nm arasındadır. Kullanılan CNT'nin parametreleri aşağıdaki çizelgede belirtilmiştir.



Resim 4.8 Nanografi çok duvarlı karbon nanotüp.

Çizelge 4.4 (-COOH) fonksiyonelleştirilmiş çok duvarlı karbon nanotüpleri Saflık: > %96, Dış Çap: 8-18 nm (İnt.Kyn.5)

Özellik	Değer
Saflık	> %96 ağırlıkça
(-COOH) içeriği	%2,2 ağırlıkça
Renk	Siyah
Dış Çap	8 - 18 nm
İç Çap	5 - 15 nm
Uzunluk	10 - 35µm
Tap Yoğunluğu	0,3 g/cm ³
Gerçek Yoğunluğu	2,4 g/cm ³
Yüzey Alanı	210 m ² /g
Kül	%1,5 ağırlıkça
Elektriksel İletkenlik	98 S/cm
Üretim Metodu	CVD

Kullanılan nanokil Molchem marka olup 800nm boyutundadır, kirleticilerden arındırılmış ve %99 saflıktadır. Yüksek yüzey alanına sahip ve adsorpsiyon uygulamalarında kullanıma uygundur. Yüksek sıcaklıklarda dahi iyi çalışabilmektedir. Polimerlerin ve diğer malzemelerin reolojik özelliklerini iyileştirmek için kullanılır. Bu sayede viskozite, elastikiyet, deformasyon sertliği, akışkanlık, plastisite ve kayma modülü gibi özellikleri değişebilir.



Resim 4.9 Molchem nanokil.

Numune boyutlarını ayarlamak için kesme işlemleri gerçekleştirilmiştir. Bu kesme işlemleri Metkon marka Metacut-M 250 model numune kesme cihazı ile yapılmıştır. Numunelerin yapısının ısıdan dolayı hasar almaması için kesme sırasında bor yağı ile soğutma işlemi yapılmıştır. Metacut-M 250, 4 beygirlik bir motora sahip olup elektronik fren sistemine sahiptir. 2800 rpm devir ve 90 mm'ye kadar malzeme kesme kapasitesine sahiptir.



Resim 4.10 Metacut-M-250 numune kesme cihazı.

Numune boyutlarını ayarlamak ve sağlıklı veri almak için Mitutoyo markasının 500-181-30 modeli dijital kumpas kullanılmıştır.



Resim 4.11 Mitutoyo 500-181-30 kumpas.

Numunelerin yüzeylerini pürüzsüzleştirmek için Metkon marka Forcipol 2V model zımparalama ve parlatma cihazı kullanılmıştır. Bu işlemi gerçekleştirme amacımız yüzeyi kirleticilerden arındırmak ve sonraki işlemlerde doğru sonuçlar almak için hazırlamaktır. Sırasıyla 80, 220, 1000, 2000 zımparalar ile zımparalanmış ve son olarak parlatma işlemleri yapılmıştır.



Resim 4.12 Metkon Forcipol 2V numune kesme cihazı.

Numune yüzeyleri hazırlandıktan sonra elektrik iletkenliği testine geçmeden önce numune yüzeylerine gümüş boya sürülmüştür. Bunun nedeni ise doğası gereği iyi iletken olan CNT'lerin PMK içerisinde dağılımının sınırlayıcı olabilmesidir. Ayrıca gümüşün yüksek iletkenliği sayesinde kompozitin elektrik direnci düşürülür ve bakır

plakalar arasına koyulan numunelerin iletkenliği daha doğru şekilde ölçölür. Bu çalışmada Elecolit 414 marka gümüş boya kullanılmıştır.



Resim 4.13 Elecolit 414 gümüş boya.

Elektrik iletkenliğini ölçmek için önceden hazırlanmış deney düzeneği üzerindeki bakır plakalara numuneler yüzeyleri tam temas edecek şekilde oturtulmuştur. Ölçüm 4 prob yöntemi ile yapılarak temas direnci en aza indirilmiştir. Numunelerin hepsinden üçer kere ölçüm alınmıştır. Bu ölçümlerin ortalamaları referans alınmıştır.



Resim 4.14 Elektriksel iletkenliğin ölçölmesi için hazırlanan deney düzeneği.

Numunelerin yerleşimi hazırlandıktan sonra Rohde & Schwarz marka HM8118 model LCR metre ile ölçüm yapılmıştır.



Resim 4.15 Rohde & Schwarz marka HM8118 LCR metre.

Çizelge 4.5 LCR metre teknik özellikleri (İnt.Kyn.6)

Özellikler	Değerler
Test Frekans Aralığı	20 Hz - 200 kHz
Temel Doğruluk	%0.05
Ölçüm Fonksiyonları	L, C, R
Dahili Polarizasyon Gerilimi	0 V - + 5 V
Dahili Polarizasyon Akımı	0 mA - 200 Ma
Harici Polarizasyon Gerilimi	0 V - + 40 V

C-THERM marka TCi model termal iletkenlik analiz cihazı ile termal iletkenlik testleri yapıldı. Her numuneden 5'er defa ölçüm alınıp bu ölçümlerin ortalaması ele alınarak sonuçlar incelendi.



Resim 4.16 C-Therm TCi termal iletkenlik analiz cihazı.

Technoorg Linda marka SEMPrep2 modeli taramalı elektron mikroskobu ile üretilen her bir numuneden 12000, 35000, 50000, 80000 ve 100000 büyütmede yüksek çözünürlüklü görüntüler alınmış ve incelenmiştir.



Resim 4.17 SEM görüntüleme cihazı.



Resim 4.18 Kalıp hazırlama.

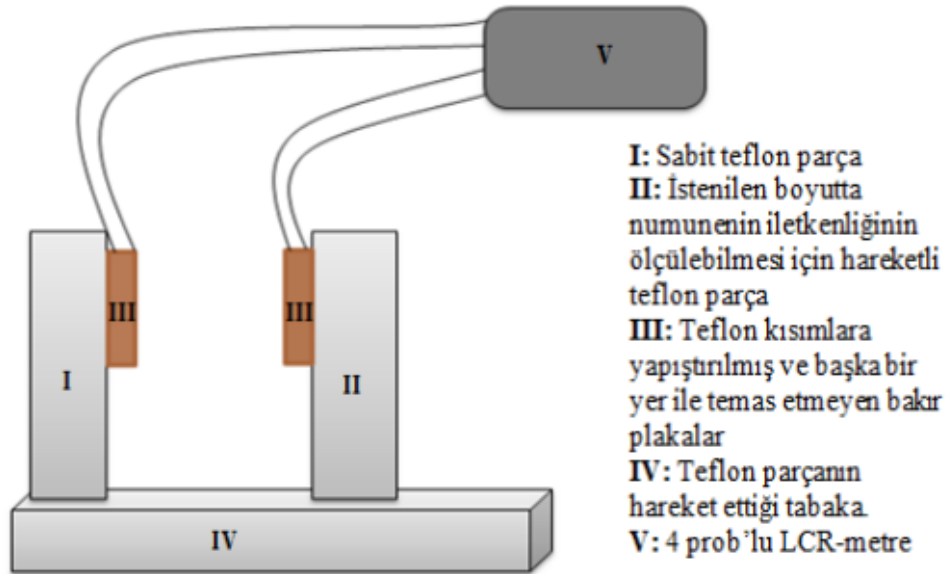


Resim 4.19 Sırasıyla %60 epoksi reçine ve %40 reçine sertleştirici karışımı ile hazırlanmış numune, %1 CNT ve %0.5 nanokil içeren gümüş boya ile kaplanmış numune ve %1 CNT ve %0.5 nanokil içeren numune.

4.1.1 Numunelerin Üretilmesi

Bu çalışmada ağırlıkça birbirinden farklı oranlara sahip CNT/Nanokil ve CNT/Disperse ajanı katkılı polimer malzemeler üretilmiştir. Üretilen numuneler SEM görüntüleri alındıktan sonra elektriksel ve termal iletkenlik testlerine tabi tutulmuştur. Bu testler sayesinde nanokil, nanotüp ve disperse ajanları ile değişen elektriksel iletkenlikleri, termal iletkenlikleri ve aglomerasyon durumları incelenmiştir. Matris malzeme olarak epoksi matris MGS LR285 kullanılmıştır İyi bir yapışma özelliği olduğu için matris malzemesi olarak bu epoksiye ağırlıkça %40 oranında MGS LH285 sertleştirici ilave edilmiştir. Takviye malzemesi olarak -COOH ile fonksiyonelleştirilmiş çok duvarlı karbon nanotüp ve Nanokar marka nanoskala düzeyinde işlenmiş kil partikülleri kullanılmıştır. Bu nanokil sodyum ve kalsiyum gibi katyonlar içeren bir kil mineralidir. Montmorillonit adı verilen bir kil mineralinin türüdür. İlk önce numuneleri oluşturmada, kalıpları Verpol RTV-2710 kalıp silikonu ile hazırlanmıştır. Hazırlanan karışıma %3 oranında(oda sıcaklığında) katalizör eklenmiş ve kürlenmeye bırakılmıştır. Bir günün sonunda kalıp hazır hale getirilmiştir. Sonrasında numune üretimine başlanmıştır. Sadece CNT ve disperse ajanı içeren numunelerin üretimi için ağırlıkça sırasıyla %0.1'den %1'e kadar CNT ve belirlenen miktardaki disperse ajanı, CNT ve nanokil içeren numuneler ise ağırlıkça önceden belirlenen miktar kadar izopropil alkolde ultrasonik karıştırıcıda dağıtılmıştır. İPA ultrasonik karıştırıcıda hava ile uzaklaştırıldıktan sonra talimatlara göre ağırlıkça %60 epoksi koyularak ultrasonik karıştırıcıda her bir numune 40 dakika boyunca 5 saniye karıştırılıp 5 saniye beklenerek %15 güçde karıştırılmıştır. Bunun nedeni matris ve takviye malzemenin sıcaklıktan zarar görmemesi ve bozunmadan kaçınılmasıdır. Karıştırma işlemleri sonucu CNT'lerin epoksi içerisinde dağıtılması ile oluşan karışım manyetik karıştırıcıya alınmıştır. Burada 40-50°C sıcaklıkta 1000rpm hızda karıştırılmıştır. Amaç, tamamen uzaklaşmamış olan İPA'ü sıcaklık ve karıştırma etkisi ile tamamen sistemden uzaklaştırmaktır. İPA bu aşamada ağırlık kontrolü yapılarak sıcaklık etkisi ile tamamen uzaklaştırılmıştır. Belirli aralıklarla ağırlık ölçülerek ağırlık sabit kalıncaya dek karıştırılmış ve ağırlık sabit kaldığında karıştırma işlemi bitirilmiştir. Numune oda sıcaklığına düştüğünde sertleştirici eklenmiştir. 2-3 dakika numune oda sıcaklığında manyetik karıştırıcı ile karıştırılmıştır. Daha sonra RAMF marka RAKU-TOOL AC-9102 modeli kalıp

yağlayıcı ile silikon kalıplar ürün kürlendikten sonra zarar görmeden rahat çıkması adına yağlanmıştır. Ve kürlenme işlemi için kalıplara dökülmüştür. Kürlenme işlemi için 1 gün beklenmiştir ve kürlenme gerçekleştikten sonra numuneler kalıplardan çıkartılmıştır. Kalıplardan çıkartılan numuneler eş boyutlarda olması için 5×5 cm boyutunda METKON METACUT-M 250 ile kesilmiştir. Daha sonra çapaklardan ve yüzeydeki kirleticilerden arındırılmak için 800, 1200, 2000 numaralı zımparalar ile zımparalanmış ve sonra yüzeyi pürüzsüz hale getirmek için alümina ile parlatılmıştır. Zımparalama işlemi METKON GRİPO 2V ile gerçekleştirilmiştir. Numuneler Mitutoyo dijital kumpas ile ölçülerek boyutları not alınmıştır. Numunelerin üzerine iletkenliğini daha sağlıklı ölçmek için nano gümüş boya kullanılmıştır. Oda sıcaklığında elektriksel iletkenliğin ölçülebilmesi için hazırlanmış deney düzeneği kullanılmıştır. Ayarlanabilir teflon yüzeyler üzerine bakır tabakalar monte edilmiş ve bu bakır tabakaların arasına numune yerleştirilerek elektrik iletkenliği LCR-metre ile ölçülmüştür. Deney düzeneği şematik olarak Şekil 4.1’de gösterilmiştir.



Şekil 4.1 Elektriksel iletkenliğin ölçümü için hazırlanan deney düzeneği.

Termal iletkenlik ölçümü için ise numunelerin analizinde C-THERM marka termal analiz cihazı kullanılmıştır. Her numuneden 5 defa ölçüm alınıp ortalaması sonuç olarak kabul edilmiştir. Son analiz ise SEM görüntüleme cihazı ile yapılmıştır. Dumlupınar Üniversitesi İLTEM laboratuvarında ki Technoorg Linda markasına ait SEMPRep2

modeli taramalı elektron mikroskobu ile incelemeler yapılmıştır.

5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Bu çalışmada epoksi/CNT kompozit malzemelerin içerisine nanokil ve disperse ajanı takviye edilerek CNT'lerin matris içerisindeki dağılımına etkisi gözlenmiş ve bu dağılımın kompozit malzemelerin elektriksel ve termal iletkenlikleri üzerine etkisi araştırılmıştır. Metallerin elektrik iletkenlikleri 10^6 - 10^8 S/m arasında değişmektedir. Polimerlere elektrik iletkenliğinin kazandırılmasında kullanılan CNT'nin elektrik iletkenliği ise 1 - 10^4 S/m aralığındadır. Çalışmada kullanılan epoksi reçinenin elektrik iletkenliği 10^{-16} - 10^{-14} S/m aralığındadır. Elektrik iletkenliği ve elektrik direnci birbirlerinin zıttı olan tanımlardır ve ters orantılıdırlar. 10^{14} Ω üzerindeki elektrik direncine sahip olan malzemeler yalıtkan malzemelerdir. 10^4 - 10^6 Ω aralığı yarı iletken olarak sınıflandırılmakta ve 10^4 Ω değerinden düşük dirençler ise iletken malzemeler olarak sınıflandırılmaktadır(Karabacak vd. 2022, İnt.Kyn7). %0,1-%1 CNT katkılı numunelerde disperse ajanının ve nanokilin içerik dağılımını, elektriksel ve termal iletkenliklerini nasıl etkilediğini görmek için çeşitli deney grupları oluşturulmuş daha sonra bu grupların elektiksel ve termal iletkenlik deneyleri yapılmıştır. Disperse ajanı kullanarak üretilen CNT/Epoksi numunelerinin yüksek elektriksel ve termal iletkenliği bize CNT oryantasyonunun elektriksel ve termal iletkenlikteki önemini göstermektedir. Elde edilen bu sonuçların Dai ve ark., (2005)'de yaptığı çalışmada alınan sonuçlarla uyumlu olduğu görülmüştür. Disperse ajanı içeren numuneler karşılaştırıldığında 1 ml ve 2 ml disperse ajanı katkılı numunelerde disperse ajanı arttığında iletkenliğin sürekli arttığı fakat 1 ml disperse ajanı içeren numunelerde %0,5 ve sonrasında sürekli artış olmadığı gözlenmiştir, bu durumda Siddiqui ve ark., (2009)'nin yaptığı çalışmada da bahsettiği gibi CNT'nin bölgesel olarak toplandığı söylenebilir. SEM görüntüleri incelendiğinde ise 1 ml disperse ajanı katkılı numunelerde %0,5 CNT oranından sonra öbeksizlik meydana gelmiştir. Elde edilen sonuçlar ile SEM görüntülerinin uyumlu olduğu görülmüştür. Nanokil eklentisi yapılarak termal iletkenlikte artış olması beklenmiştir, CNT oranı sabit olan numunelere ağırlıkça farklı oranlarda nanokil eklenmiştir, sonuçlarda görülmektedir ki %1 CNT oranına sahip ve yüzdece artan nanokil oranlarında hibridizasyon etkisi ile termal iletkenlikte artış meydana gelmiştir. Bu sonuç benzer çalışmalarla ortak sonuçlar vermektedir. HDPE matrisine dahil edilen

BN ve CNT dolgu maddelerini kullanarak termal iletkenlik üzerindeki hibridizasyon etkisini araştırdı. Çalışma, farklı boyut ve tipte dolgu maddelerinin kullanılmasının ısı iletkenlik üzerinde çok büyük bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Ağırlıkça %25 BN ve ağırlıkça %3 CNT kullanılması termal iletkenlikte %300 artışa yol açmıştır(Che vd. 2018).

Çizelge 5.1 ve Çizelge 5.2, %0,1-%1 aralığında CNT ile takviye edilmiş 1 ml ve 2 ml disperse ajanı içeren numunelerin elektriksel iletkenlik sonuçlarını vermektedir. Şekil 5.1’de ise bu sonuçların grafiğe dökülmüş hali görölmektedir.

5.1 Elektriksel İletkenlik

Çizelge 5.1 CNT oranı düzenli artan ve 1ml disperse ajanı eklentili numunelerin elektriksel iletkenlikleri.

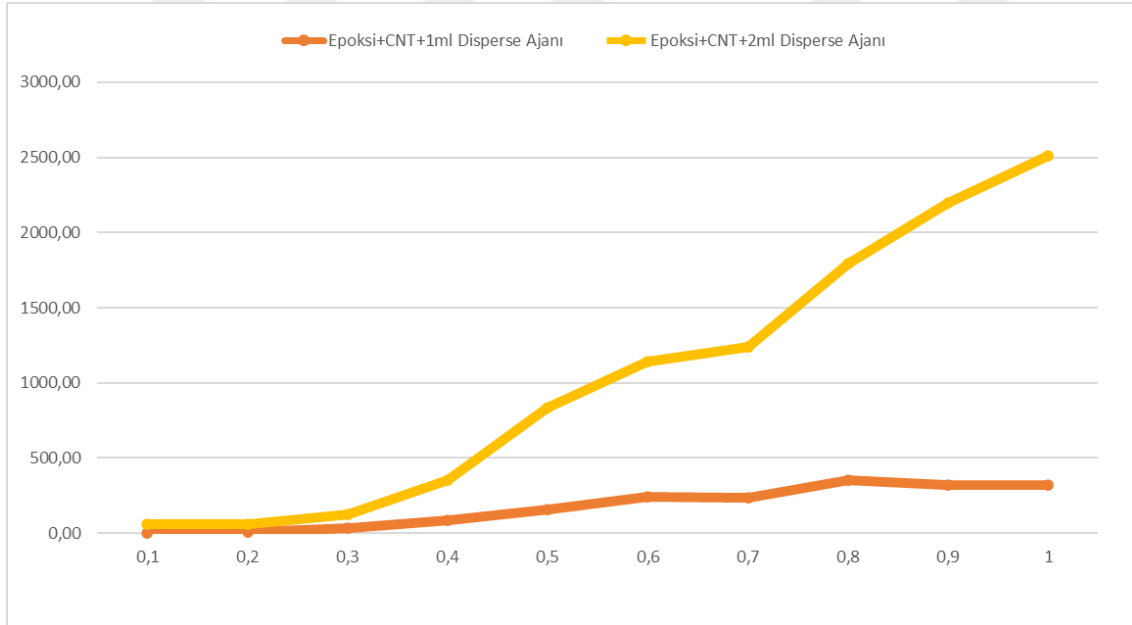
Numune No	%CNT	Disperse Ajanı(ml)	İletkenlik (S/m)*10 ⁻⁶
1	0,1	1	1,59
2	0,2	1	8,78
3	0,3	1	34,21
4	0,4	1	85,72
5	0,5	1	157,63
6	0,6	1	240,76
7	0,7	1	236,65
8	0,8	1	352,23
9	0,9	1	320,17
10	1	1	322,43

Tabloda da gözüktüğü üzere CNT oranı arttıkça 1 ml disperse ajanı eklentisi ile CNT oranında %0.1’den %0.8’e kadar düzenli bir elektrik iletkenliği artışı olduğu söylenebilir.

Çizelge 5.2 CNT oranı düzenli artan ve 2ml disperse ajanı eklentili numunelerin elektriksel iletkenlikleri

Numune No	%CNT	Disperse Ajanı(ml)	İletkenlik (S/m)*10 ⁻⁶
11	0,1	2	54,34
12	0,2	2	50,41
13	0,3	2	89,49
14	0,4	2	269,70
15	0,5	2	677,40
16	0,6	2	903,10
17	0,7	2	1001,20
18	0,8	2	1441,50
19	0,9	2	1877,60
20	1	2	2185,70

Disperse ajanı eklentisini 2 ml'ye çıkarttığımızda 3 ile 6 kat arasında elektriksel iletkenlikte artışlar meydana gelmiştir. Bu karşılaştırmaya göre disperse ajanının bu çalışmada istenileni verdiğini ve elektriksel iletkenlikte artış sağladığını görmekteyiz.



Şekil 5.1 Disperse ajanı katkılı ve CNT içeren numunelerin elektriksel iletkenliği.

Çizelge 5.1 ve Çizelge 5.2 incelendiğinde CNT artışı ile birlikte elektriksel iletkenlikte artış olduğu gözlenmektedir ve bu beklenen bir durumdur. Ancak 1 ml disperse ajanı ve

2 ml disperse ajanı ile takviye edilen numuneleri karşılaştırdığımızda aynı CNT oranına sahip reçetelerde 2 ml disperse ajanı ile takviyelenmiş numunelerin elektriksel iletkenliğinin daha yüksek olduğu görülmüştür. Hatta 1 ml disperse ajanına sahip numunelerde %0.8 CNT oranında en yüksek elektriksel iletkenlik elde edilmiş bundan sonra %0.9 ve %1 'de küçük bir düşüş gözlenmiştir. Oysa 2 ml takviyeli numunelerde CNT oranı arttıkça elektirksel iletkenliğin arttığı gözlenmiştir. Bu durum 1 ml disperse ajanının aglomerasyonu azaltmada bir yere kadar yeterli olduğunu daha sonra CNT miktarı arttıkça etkinin azaldığı şeklinde yorumlanabilir. 2 ml'lik takviyenin ise dağılımı daha fazla desteklediği için elektriksel iletkenliği daha fazla arttırdığı düşünülmektedir. Şekil 5.1'deki grafiği incelediğimizde ise bu sonuçları daha net bir şekilde görmekteyiz.

Çizelge 5.3 Değişken oranlarda CNT içeren numunelerin elektriksel iletkenlikleri.

Numune No	%CNT	İletkenlik (S/m)*10 ⁻⁶
21	0.1	1,01
22	0.2	4,75
23	0.3	5,12
24	0.4	19,84
25	0.5	85,43
26	0.6	102,37
27	0.7	122,35
28	0.8	156,09
29	0.9	201,54
30	1	222,36

Disperse ajanından sonra nanokilin varlığının CNT dağılımı üzerinde etkisini araştırmak için çeşitli numune grupları üretilmiştir. Çizelge 5.3 'te epoksi ve ve farklı oranlarda CNT içeren numunelerin elektriksel iletkenlik sonuçları, Çizelge 5.4 'te sabit %0.5 kil oranına ve farklı oranlarda CNT'e sahip numunelerin elektriksel iletkenlik sonuçları, Çizelge 5.5'te ise sabit %0.5 CNT oranına ve farklı oranlarda kile sahip numunelerin elektriksel iletkenlik sonuçları verilmiştir.

Çizelge 5.4 Sabit nanokil ve artan CNT içeren numunelerin elektriksel iletkenlikleri.

Numune No	%CNT	%Kil	İletkenlik (S/m)*10 ⁻⁶
31	0,1	0,5	0,13
32	0,2	0,5	1,51
33	0,3	0,5	9,91
34	0,4	0,5	69,83
35	0,5	0,5	127,34
36	0,6	0,5	225,52
37	0,7	0,5	248,56
38	0,8	0,5	180,34
39	0,9	0,5	130,45
40	1	0,5	129,34

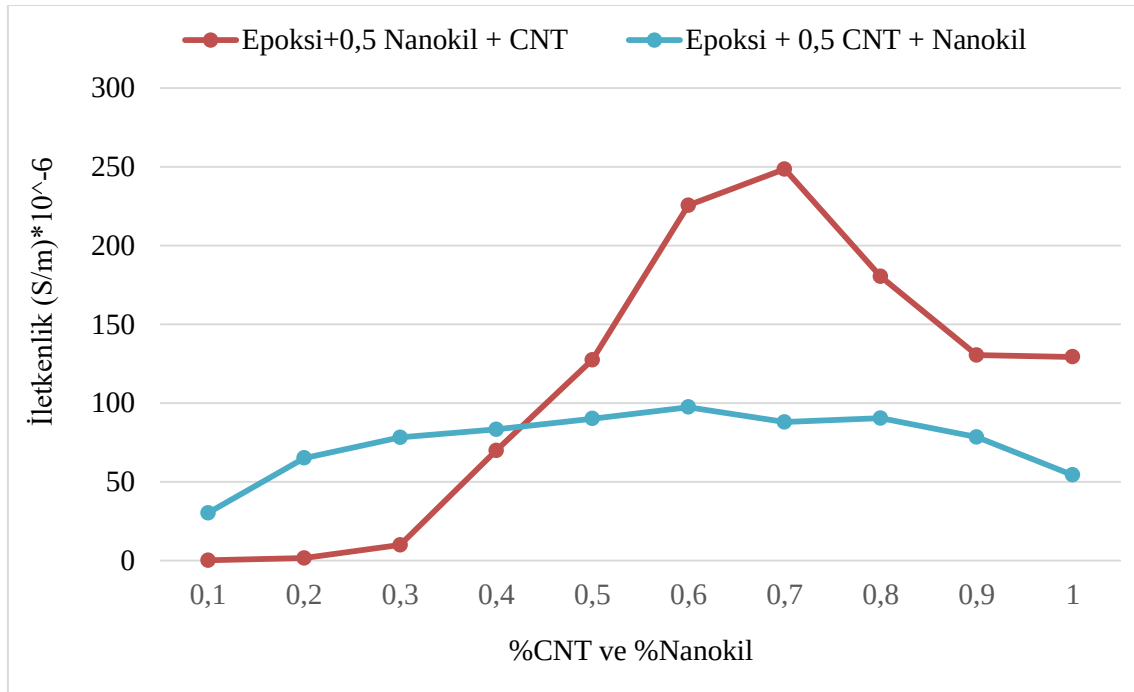
Disperse ajanı eklentisi olmadan %0.1'den %1'e kadar artan CNT ile sabit %0.5 oranında kil eklentisi ile sonuçları incelediğimizde nanokil eklentisinin elektriksel iletkenliği düşürdüğünü fakat yine de artan CNT ile beraber iletkenliğin CNT içeriğinin %0.1'den %0.7'ye kadar olan numunelerde arttığı görülebilir. Optimal noktadan sonra iletkenlik tekrar düşmeye başlamıştır.

Çizelge 5.5 Sabit CNT ve artan nanokil içeren numunelerin elektriksel iletkenlikleri.

Numune No	%CNT	%Kil	İletkenlik (S/m)*10 ⁻⁶
41	0,5	0,1	30,18
42	0,5	0,2	65,12
43	0,5	0,3	78,23
44	0,5	0,4	83,26
45	0,5	0,5	90,12
46	0,5	0,6	97,37
47	0,5	0,7	87,96
48	0,5	0,8	90,37
49	0,5	0,9	78,43
50	0,5	1	54,34

Çizelge 5.3 ve Çizelge 5.4 incelendiğinde nanokilin varlığının CNT dağılımına olumlu etki yaparak elektriksel iletkenliği arttırdığını görmekteyiz. Çizelge 5.4 ve Çizelge 5.5

incelendiğinde ise elektriksel iletkenliğin CNT içeriğinden daha fazla etkilendiği görülmektedir. Sabit %0.5 nanokil içeren numunelerde CNT içeriği arttıkça elektriksel iletkenlikte bir artış görülmekle beraber %0.8 CNT miktarından sonra iletkenlik düşmüştür. Bu duruma artan nano partikül miktarının epoksinin viskozitesini çok fazla arttırarak yeterli bir karışım sağlanamamasının neden olduğu düşünülmektedir. Üretim sırasında da bu numunelerin karıştırma ve dökme işlemi oldukça zorlamıştır. Sabit %0.5 CNT ve değişken kil içeren numunelerde ise elektriksel iletkenlikte yine bir artış görülmekle birlikte bu artışın çok fazla olmadığı belirlenmiştir. Yüksek içeriklerde ise diğer numune grubu gibi burada da bir düşüş yaşanmıştır.



Şekil 5.2 %0,1'den %1'e kadar değişken oranlı CNT ve %0,5 sabit oranlı nanokil içeren numuneler(bordo renkle gösterilmiş) ve %0,1'den %1'e kadar değişken oranlı nanokil ve %0,5 sabit oranlı CNT içeren numune setlerinin(mavi renkle gösterilmiş) elektriksel iletkenliği.

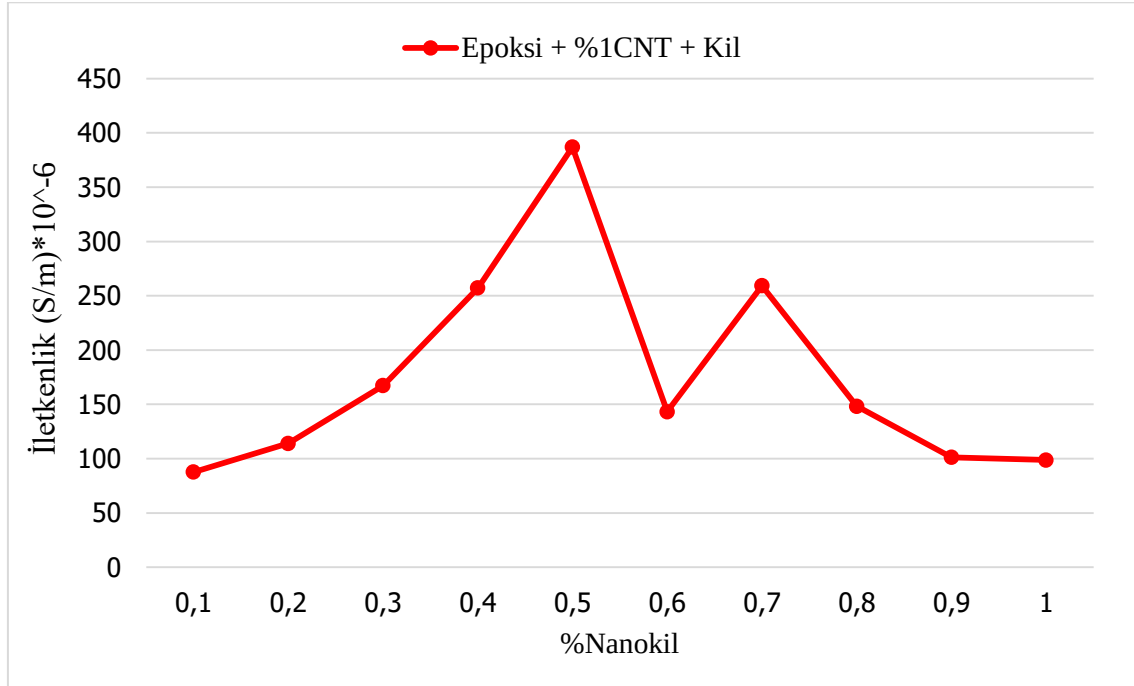
%0,1'den %1'e kadar artan CNT ve %0,5'de sabit tutulan nanokil içeriğine sahip numune setleri incelendiğinde CNT oranı yükseldikçe elektriksel iletkenlik artmıştır. Fakat %0.8

CNT ve %0,5 nanokil oranına sahip numuneden sonra %1 CNT ve %0,5 nanokil içeren numeneye kadar elektriksel iletkenlik düşmüştür. Bunun sebebinin artan CNT miktarı ile beraber içeriğin aglomere olduğu düşünülmektedir.

Çizelge 5.6 CNT oranı sabit ve nanokil oranı artırılan numunelerin elektriksel iletkenlikleri.

Numune No	%CNT	%Kil	İletkenlik (S/m)*10 ⁻⁶
51	1	0,1	87,75
52	1	0,2	114,12
53	1	0,3	167,36
54	1	0,4	257,21
55	1	0,5	386,87
56	1	0,6	143,34
57	1	0,7	259,34
58	1	0,8	148,23
59	1	0,9	101,21
60	1	1	98,76

Yine farklı bir numune seti denendiğinde bu sefer disperse ajanı kullanılmamış, CNT oranı %1’de sabit tutulmuş nanokil oranı %0.1’den %1’e kadar artırılarak eklendiğinde %0.5’e kadar artmış fakat sonrasında düşmeye başlamıştır.



Şekil 5.3 %1 oranında CNT ve %0,1'den %1'e kadar artan nanokil içeren numunelerin elektriksel iletkenliği.

Çizelge 5.6'de ve Şekil 5.3'de CNT içeriği %1' e çıkarılarak ve değişik oranlarda nanokil takviye edilerek hazırlanmış numune grubunun elektriksel iletkenlik sonucu görülmektedir. Artan CNT miktarı elektriksel iletkenliğin de artmasına neden olmuş, nanokilin varlığı ise grafiği çizilmiş numune seti incelendiğinde elektriksel iletkenliğin ilk aşamada arttığı görülmüştür. %0,5 nanokilden sonra düşmeye başladığında düşüşün devam etmesi beklenmiş fakat %0,7'de tekrar yükselmiştir. Akabinde elektriksel iletkenlik düşmeye devam etmiştir. Bu durumun meydana gelmesi %0,6 nanokil içeren numunede ultrasonik karıştırma işleminin nanotüp boyunu azalttığı ve iletkenliği düşürdüğü ya da yapının aglomere olduğu düşünülmektedir.

Bu sonuçlar göz önüne alındığında söylenebilir ki sadece CNT kullanılan numunelerde disperse ajanı eklentisi 1ml'den 2ml'ye çıkarıldığında daha homojenize bir içerik elde edilmiş ve elektrik iletkenliği gözle görülür şekilde artmıştır. Disperse ajanı içeren her iki içerik incelendiğinde 1ml ilaveli numune %0.8 CNT katkısına kadar düzenli olarak artmış fakat sonrasında düşmeye başlamıştır. Bunun nedeni numune içeriğinin belirli bir doygunluğa ulaştığı ve sonrasında CNT'nin ya da disperse ajanının etkisinin azaldığı söylenebilir. Öte yandan 2ml disperse ajanı eklentisi yapılan numunelerde CNT oranı arttıkça elektriksel iletkenlik artmıştır. Her iki disperse ajanı ilaveli numune setleri karşılaştırıldığında 2ml ilave edilen numuneler 1ml ilaveli numunelere göre çok daha fazla elektriksel iletkenlik göstermişlerdir.

Diğer yandan CNT oranlarının sabit tutulup nanokil oranlarının artırıldığı iki farklı içerikte görülebilir ki CNT'nin %0.5 sabit tutulup nanokilin %0.1'den %1'e kadar artırıldığı içeriklerde elektrik iletkenliği, CNT'nin %1 oranında sabit tutulup nanokil %0.1'den %1'e artırıldığı içerikten daha fazladır. Bu sonuçlardan aynı oranda artış gösteren nanokil oranlarında dahi CNT miktarı belirleyici rol oynamıştır. Nanokil eklentisi olan numunelerin elektrik iletkenliği belirli bir noktaya kadar artarken sonra düşmeye başlamıştır. Bunun nedeni olarak nanokillerin belirli bir miktardan sonra içerikte homojen bir şekilde dağılamaması veya numune içeriğinin belirli bir optimal noktadan sonra iletkenliğinin artmaması gösterilebilir.

5.2 Termal İletkenlik

Çizelge 5.7 Artan CNT oranı ve 1ml disperse ajanı içeren numunelerin termal iletkenlikleri.

Numune No	%CNT	Disperse Ajanı(ml)	Termal iletkenlik(W\mK)
1	0,1	1	0,43
5	0,5	1	0,51
10	1	1	0,57

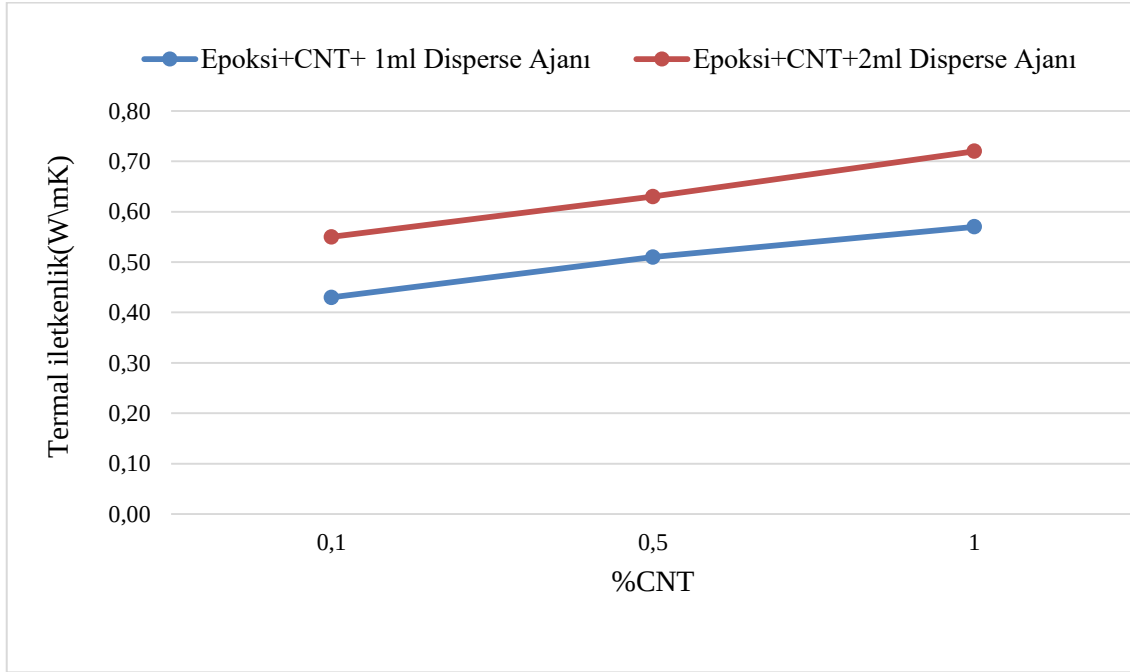
Bu çizelge incelendiğinde CNT oranının düzenli bir şekilde arttığı ve her numune içeriğine 1ml disperse ajanı koyulduğunu görüyoruz. Termal iletkenlik tarafından incelendiğinde ise CNT oranı arttıkça W\mK cinsinden iletkenliğin düzenli şekilde artış gösterdiğini görmekteyiz. Yani karbon nanotüp ile termal iletkenlik arasında doğrusal bir ilişki olduğunu söyleyebiliriz.

Çizelge 5.8 Artan CNT oranı ve 2ml disperse ajanı içeren numunelerin termal iletkenlikleri.

Numune No	%CNT	Disperse Ajanı(ml)	Termal iletkenlik(W\mK)
11	0,1	2	0,55
15	0,5	2	0,63
20	1	2	0,72

Bu numune setini incelediğimizde CNT oranının sabit şekilde arttığını ve kullanılan disperse ajanının 2ml olduğunu görmekteyiz. Bu numunelerin termal iletkenliklerini incelediğimizde termal iletkenlik CNT oranı arttıkça artmıştır. Diğer numune setinde artan CNT oranı ve 2ml disperse ajanı göz önüne alınıp karşılaştırıldığında görülmektedir ki disperse ajanının fazla kullanıldığı aynı CNT oranlarında termal iletkenlik belirgin şekilde artış göstermiştir. Burada disperse ajanının homojenliği

artırdığını ve CNT'yi homojen bir şekilde dağıttığı söylenebilir. Bu homojen dağılım sayesinde termal iletkenliğinde arttığı söylenebilir.



Şekil 5.4 Epoksi, CNT, 1 ve 2 ml disperse ajanı içeren numunelerin termal iletkenlikleri.

Şekil 5.4’de görülmektedir ki iki numune setinde de termal iletkenlik artış göstermiştir. Fakat artan CNT ile beraber 1 ml disperse ajanı kullanılan numuneler ile aynı CNT oranlarına sahip fakat 2 ml disperse ajanına sahip numunelerde daha fazla termal iletkenlik sergilenmiştir. Disperse ajanının fazla olması numunenin aglomere olmadan karıştığını göstermektedir fakat 1 ml disperse ajanı epoksinin yüksek viskozitesi karşısında istenilen verimi verememiştir. Daha homojen olan numunelerin termal iletkenliğinin daha fazla olduğu söylenebilir.

Çizelge 5.9 Sabit nanokil oranı ve artan CNT içeren numunelerin termal iletkenlikleri.

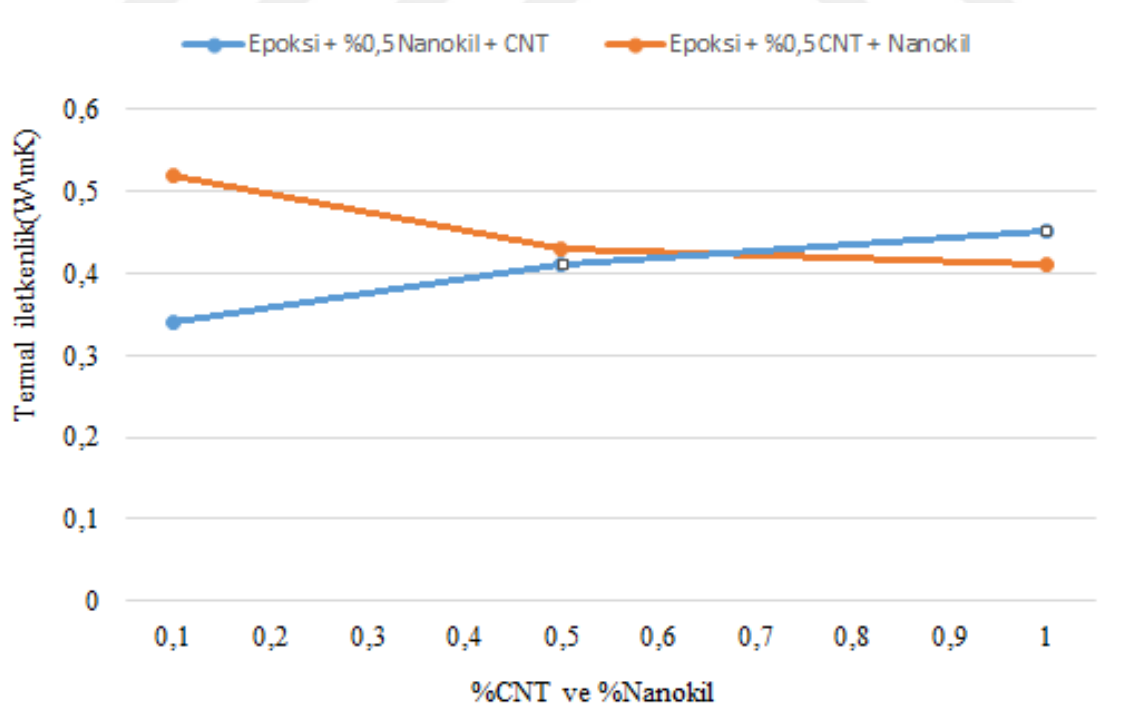
Numune No	%CNT	%Kil	Termal iletkenlik(W/mK)
21	0,1	0,5	0,34
25	0,5	0,5	0,41
30	1	0,5	0,45

Bu numune seti incelendiğinde nanokil oranının %0.5’de sabit tutulduğunu ve CNT oranının sabit bir şekilde artırıldığını görmekteyiz. Disperse ajanı içermeyen bu numuneler CNT oranıyla paralel bir şekilde termal iletkenlik de artış göstermiştir.

Çizelge 5.10 Sabit CNT oranı ve artan nanokil içeren numunelerin termal iletkenlikleri.

Numune No	%CNT	%Kil	Termal iletkenlik(W/mK)
31	0,5	0,1	0,52
35	0,5	0,5	0,43
40	0,5	1	0,41

Bu deney setinde ise CNT oranı %0.5’de sabit tutulurken nanokil oranı %0.1’den %1’e kadar artarak devam etmiştir. Termal iletkenlikleri incelediğimizde belirli bir noktadan sonra iletkenliğin düştüğünü görmekteyiz. Bunun nedeninin numune içerisindeki nanokilin artmasından dolayı olduğu söylenebilir. Bu tabloda da görülüyor ki yüzde bakımından nanokil numune içerisinde CNT oranını geçtikten sonra termal iletkenlik düşüş göstermiştir.



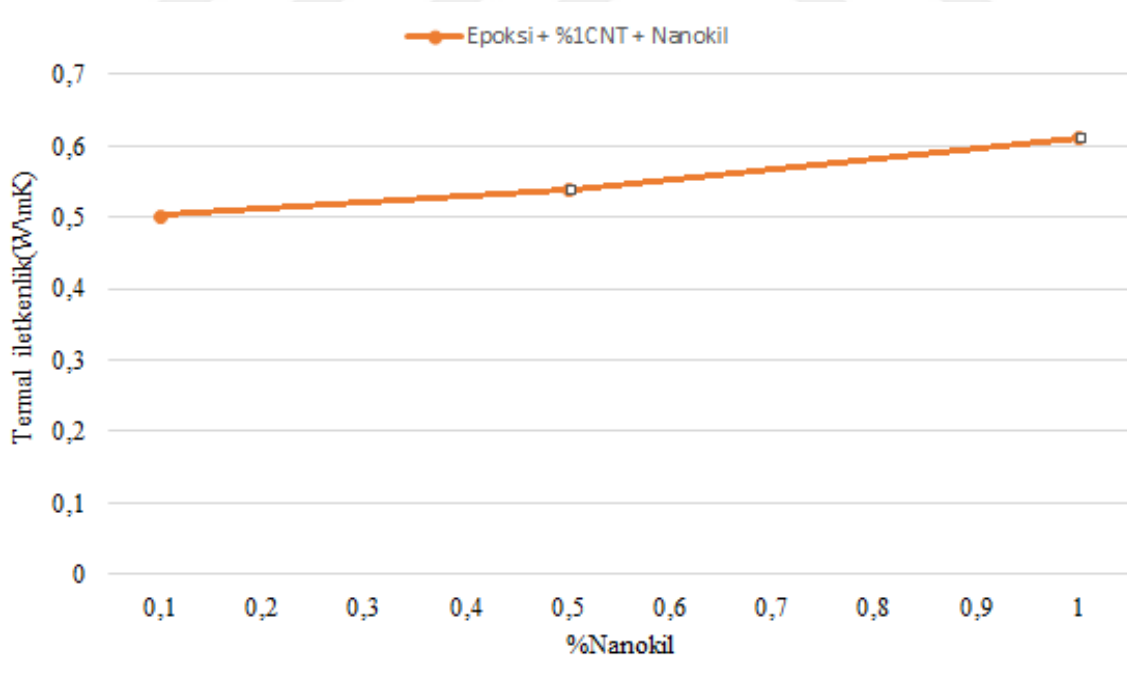
Şekil 5.5 %0,5 nanokil ve artan CNT oranları olan numune seti ile %0,5 CNT ve artan nanokil oranlarına sahip numune setinin karşılaştırılması.

%0,5 Nanokil ve artan CNT içeren numunelerde görülmektedir ki CNT oranı arttıkça iletkenlik artmıştır. CNT oranı artışının termal iletkenliği artırdığını söyleyebiliriz. %0,5 CNT ve artan nanokil içeren numunelerde ise termal iletkenlik CNT'nin fazla olduğu içerik durumunda yüksek iken nanokil oranı arttıkça düşmeye başlamıştır. Bu durumda nanokilin bu numune setinde termal iletkenliği olumsuz etkilediği düşünülebilir. Bunun nedeni ise CNT'den daha fazla bulunan nanokilin topaklanması olduğu düşünülmektedir.

Çizelge 5.11 Sabit CNT oranı ve artan nanokil içeren numunelerin termal iletkenlikleri.

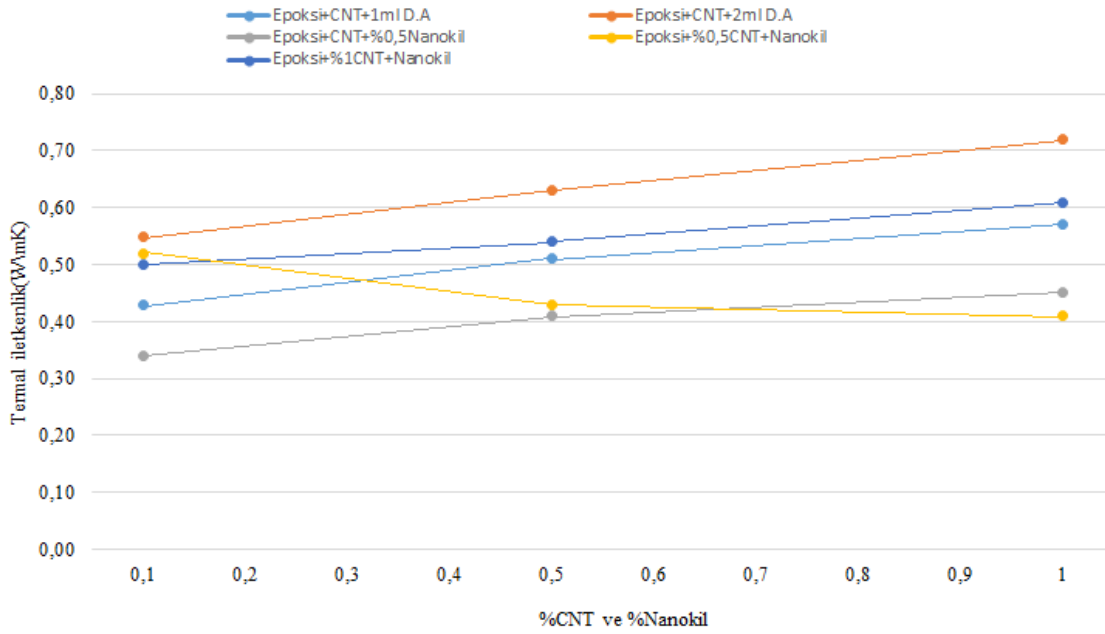
Numune No	%CNT	%Kil	Termal iletkenlik(W/mK)
41	1	0,1	0,5
45	1	0,5	0,54
50	1	1	0,61

Bu deney setinde görüldüğü üzere CNT oranı %1'de sabit tutulmuş ve nanokil oranı %0,1'den %1'e kadar artarak devam etmiştir. Bu tabloya göre %1 CNT oranında, nanokil oranı %1'e çıkartılana kadar her aşamada termal iletkenlik artış göstermiştir.



Şekil 5.6 Epoksi, %1 CNT ve nanokil içeren numune grubunun termal iletkenlikleri.

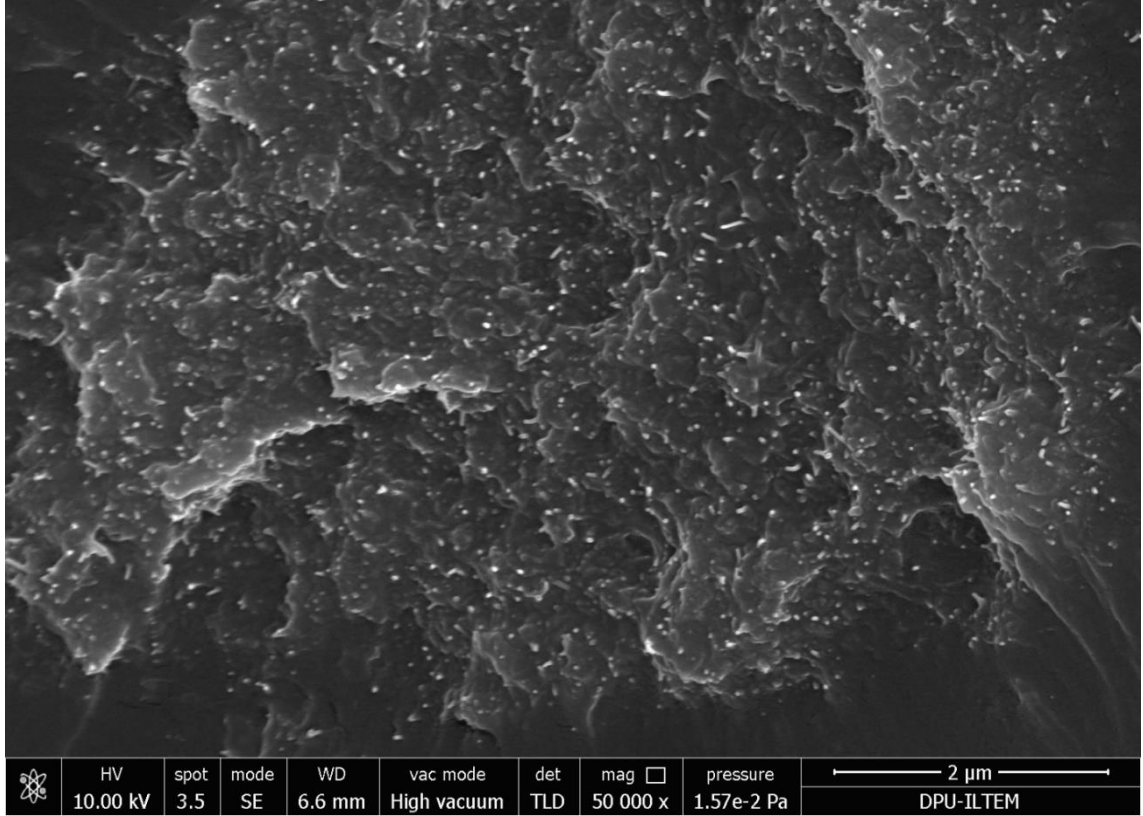
Çizelge 5.10 ve Şekil 5.6 incelendiğinde termal iletkenlik artış göstermiştir. Bu numune setinde CNT içeriği %1’de sabit tutulmuş nanokil içeriği ise %0,1’den %1’e kadar çıkartılmıştır. Disperse ajanı kullanılmamıştır fakat boyut olarak daha küçük olan CNT’lerin oluşturduğu ve bağlandığı yüzeyler sayesinde ultrasonik karıştırmada aglomerasyonu önlediği ve homojen dağılım sonucu termal iletkenliğin arttığı düşünülmektedir.



Şekil 5.7 Numune setlerinin termal iletkenliğinin karşılaştırılması.

Grafik incelendiğinde termal iletkenliği en yüksek numune setinin 2 ml disperse ajanı içeren ve %0,1’den %1’e kadar artan CNT içeriğe sahip numuneler olduğu söylenebilir. Bu numune seti incelendiğinde görülmektedir ki sabit bir şekilde artmış olan CNT’ye ilave edilen 2ml disperse ajanı ile en iyi termal iletkenliğe sahip olan numunelerdir. %1 oranında CNT oranı olup artan nanokil oranına sahip numune grubundaise nanokil oranı arttıkça termal iletkenliğin en yüksek olan ikinci numune seti olduğu söylenebilir. 1 ml disperse ajanı ve artan CNT oranlarına sahip numune setinin üçüncü en iyi termal iletkenliğe sahip olduğu söylenebilir. 0.5 CNT oranına sahip olup yükselen nanokil oranına sahip olan numuneler incelendiğinde ise termal iletkenliğin düştüğünü görmekteyiz. %0,5 Nanokil ve artan CNT içeriğine sahip olan numune setinin ise termal iletkenliğinin yavaş bir şekilde arttığı gözlenmiştir.

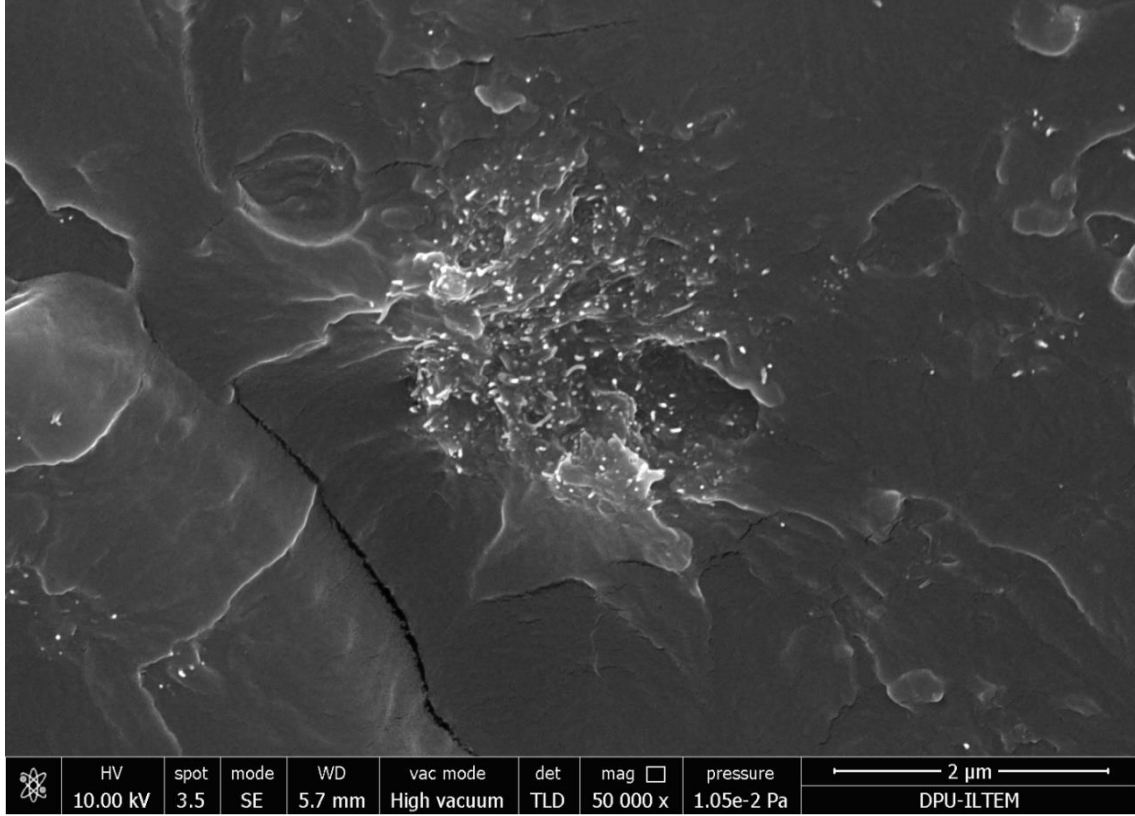
Elektriksel ve termal iletkenlik deneylerinin sonuçlarını daha iyi yorumlayabilmek adına numunelerden SEM görüntüleri alınmıştır. Öncelikle hem elektriksel hem de termal iletkenliği olumlu olarak daha fazla etkileyen disperse ajanı içeren numunelerin görüntüleri alınmıştır. Şekil 5.8’de 2 ml disperse ajanı %1 CNT içeren numunenin SEM görüntüsü görülmektedir. 50000 büyütme yapılmış ve numune incelenmiştir. Epoksi içeriği de CNT içeriği gibi karbon, hidrojen ve oksijenden oluştuğu için EDX analizi yapılamamış olup malzeme içeriğinin homojen dağılmasından dolayı, kontrast farkının olduğu beyaz noktalar ve tüpler halinde gözükken cisimlerin CNT olduğu düşünülmektedir. Bu bağlamda karbon nanotüpleri homojen bir şekilde dağıldığı görülmektedir.



Şekil 5.8 2 ml disperse ajanı ve %1 CNT içeren numunenin SEM görüntüsü.

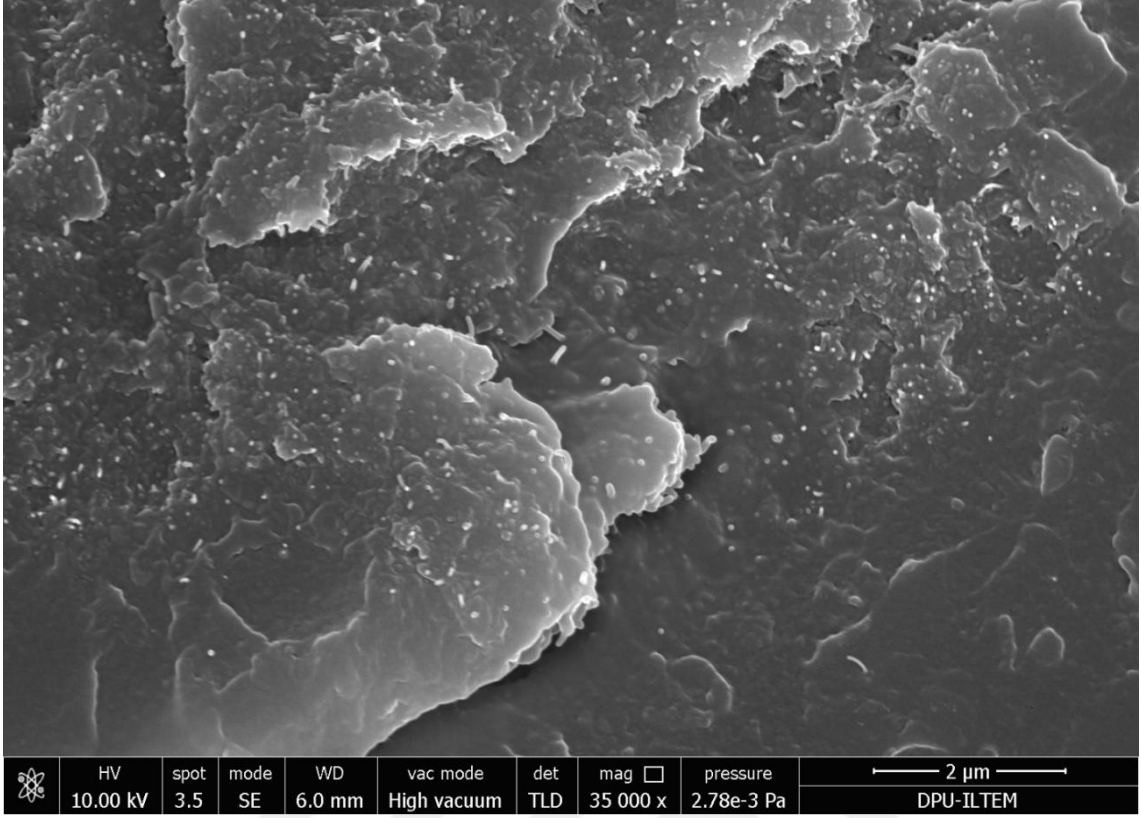
Şekil 5.9’da ise 1 ml disperse ajanı %1 CNT içeren numunenin SEM görüntüsü bulunmaktadır. Kırık yüzeyden alınan SEM görüntüsünde karbon nanotüplerin aglomere olmadığı fakat öbek öbek olarak daha düzensiz bir dağılım gösterdiği

görülmektedir.

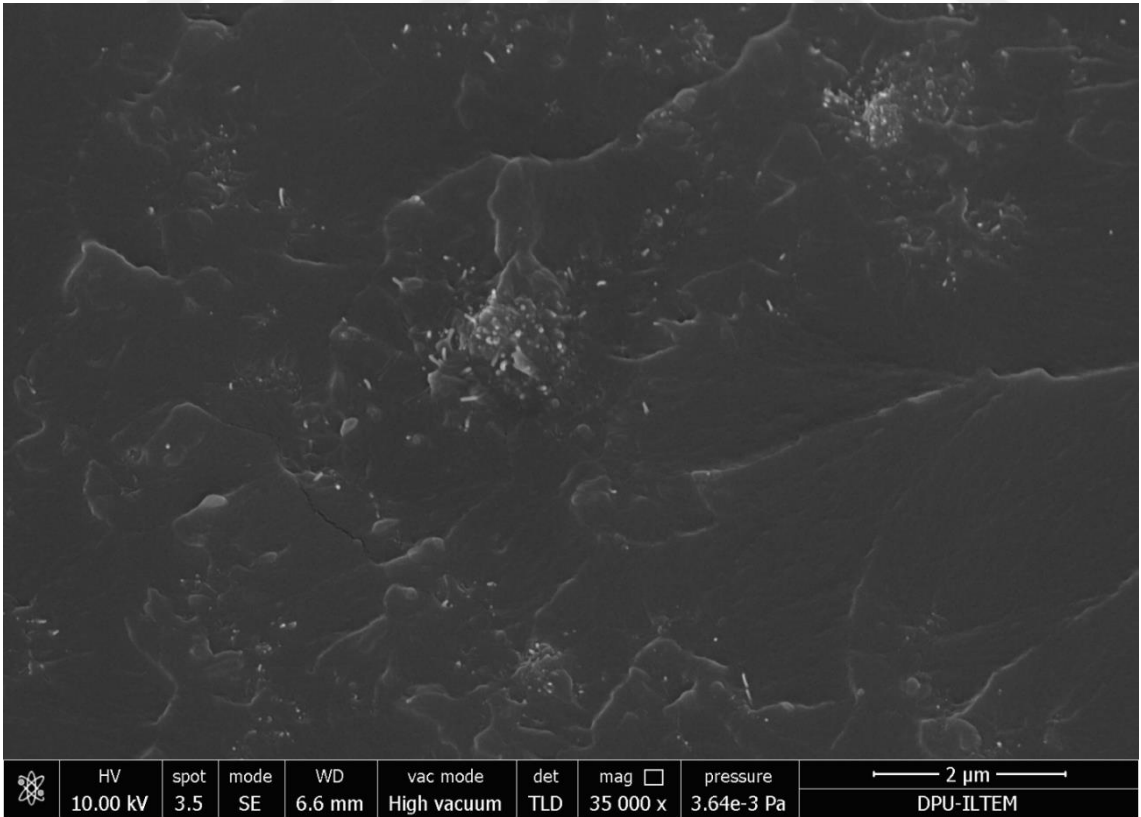


Şekil 5.9 1 ml disperse ajanı ve %1 CNT içeren numunenin SEM görüntüsü.

Büyütme miktarı azaltılıp (35000X) biraz daha genel bir bakış sağlandığında ise yine 2 ml disperse ajanı, %0.5 CNT içeren numunede daha homojen bir dağılım gözlemlenirken, 1ml disperse ajanı içeren numunede aynı büyütmede öbikleşmeler görülmüştür(Şekil 5.10 ve Şekil 5.11).

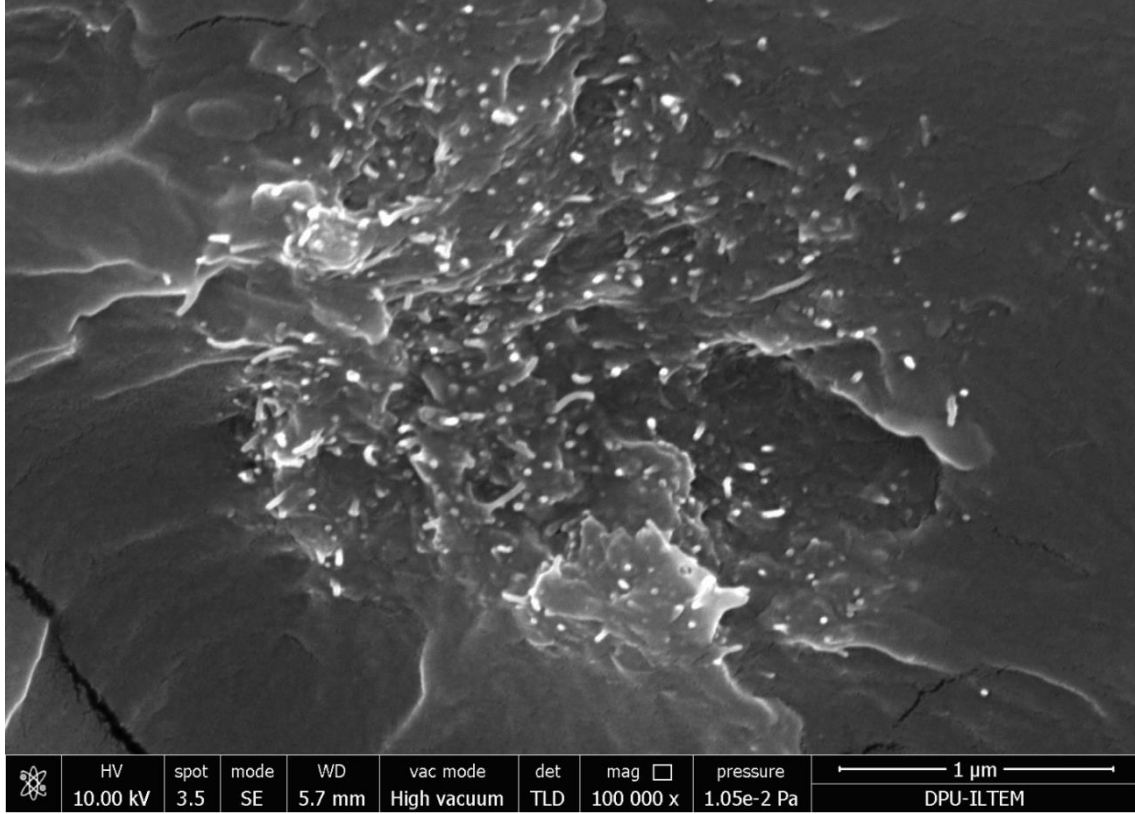


Şekil 5.10 2 ml disperse ajanı ve %0,5 CNT içeren numunenin SEM görüntüsü.

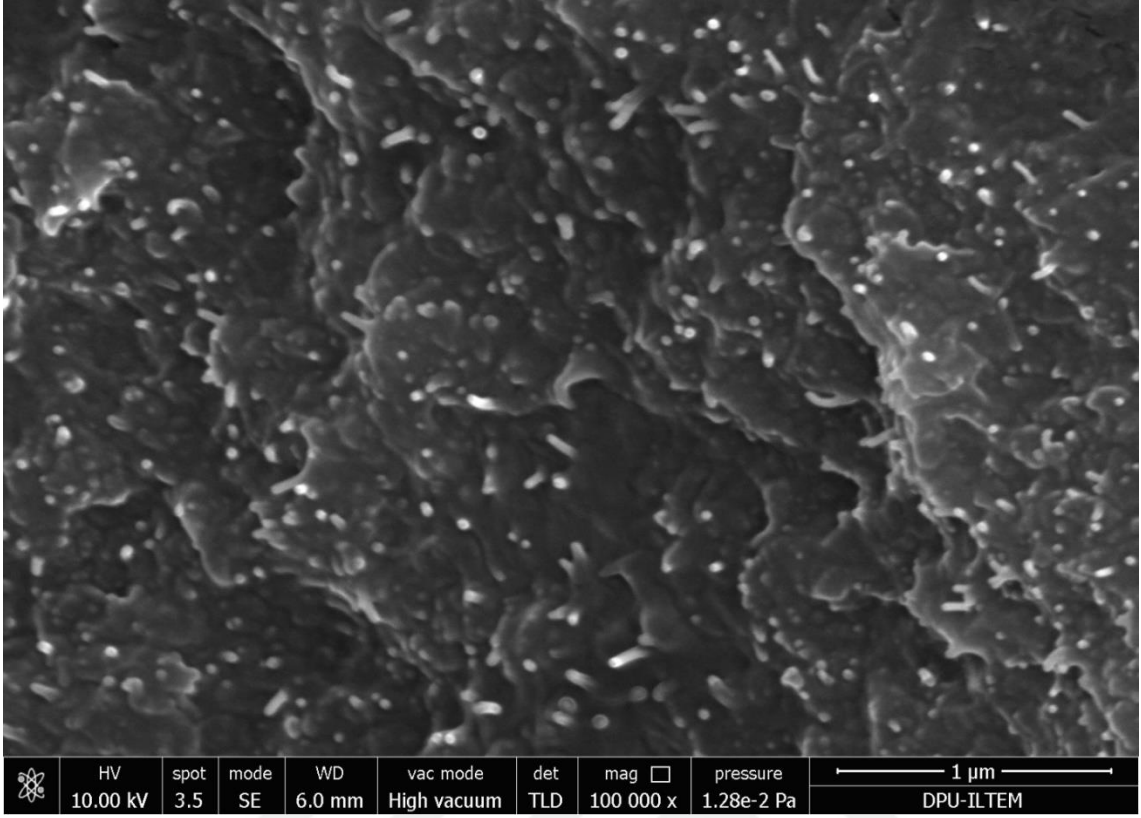


Şekil 5.11 1 ml disperse ajanı ve %0,5 CNT içeren numunenin SEM görüntüsü.

Büyütme miktarı 100000X'e çıkarılıp öbeklere yaklaşıldığında ise 1 ml disperse ajanı ile 2 ml disperse ajanı içeren numuneler arasındaki fark daha net belli olmaktadır. 2 ml disperse ajanı kullanılan numunelerin dağılımının daha iyi olduğu açık bir şekilde görülmektedir ki zaten bu sonuç elektriksel ve termal iletkenliklere de yansımıştır.

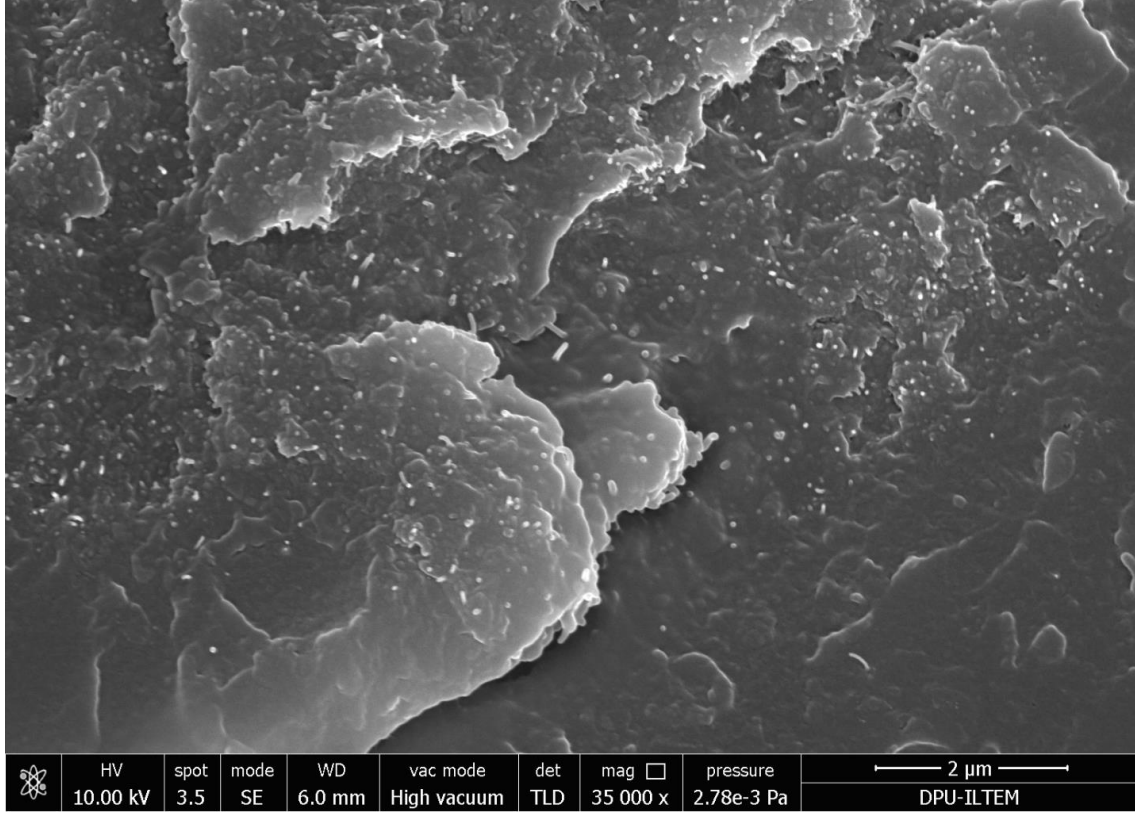


Şekil 5.12 1 ml disperse ajanı %0.5 CNT içeren numunenin SEM görüntüsü.

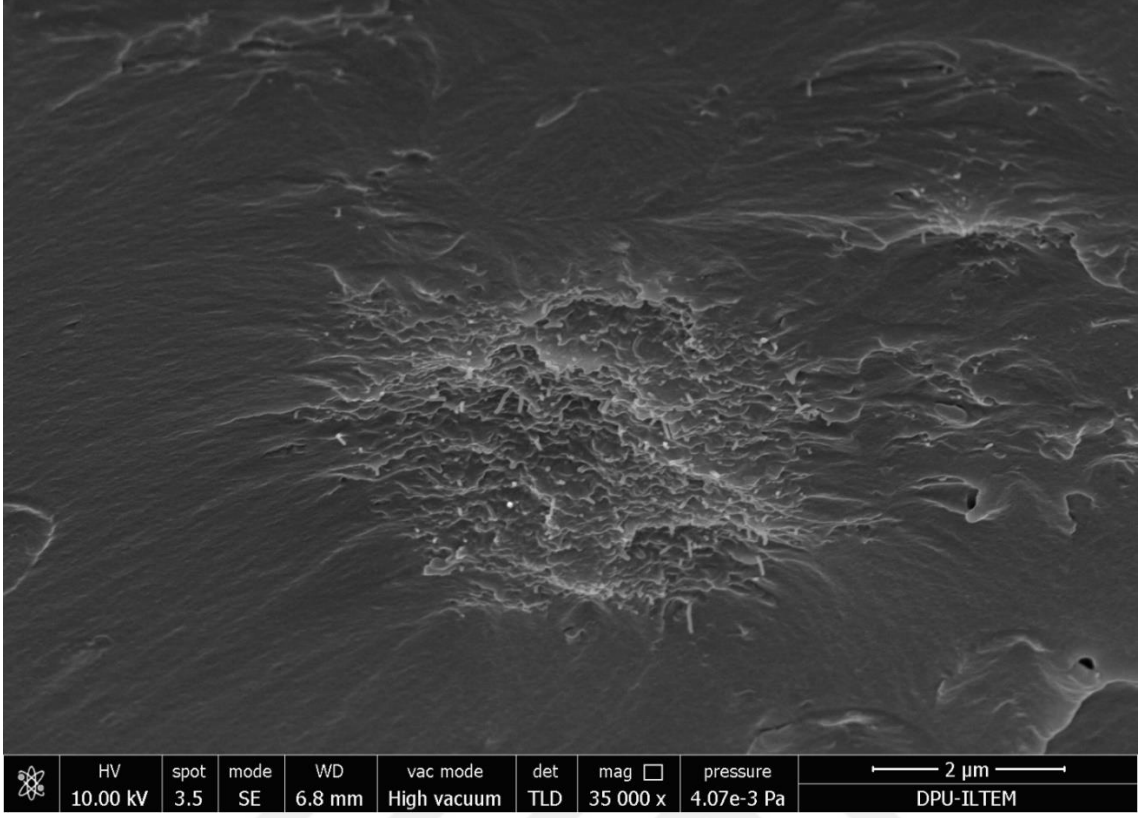


Şekil 5.13 2 ml disperse ajanı %0.5 CNT içeren numunenin SEM görüntüsü.

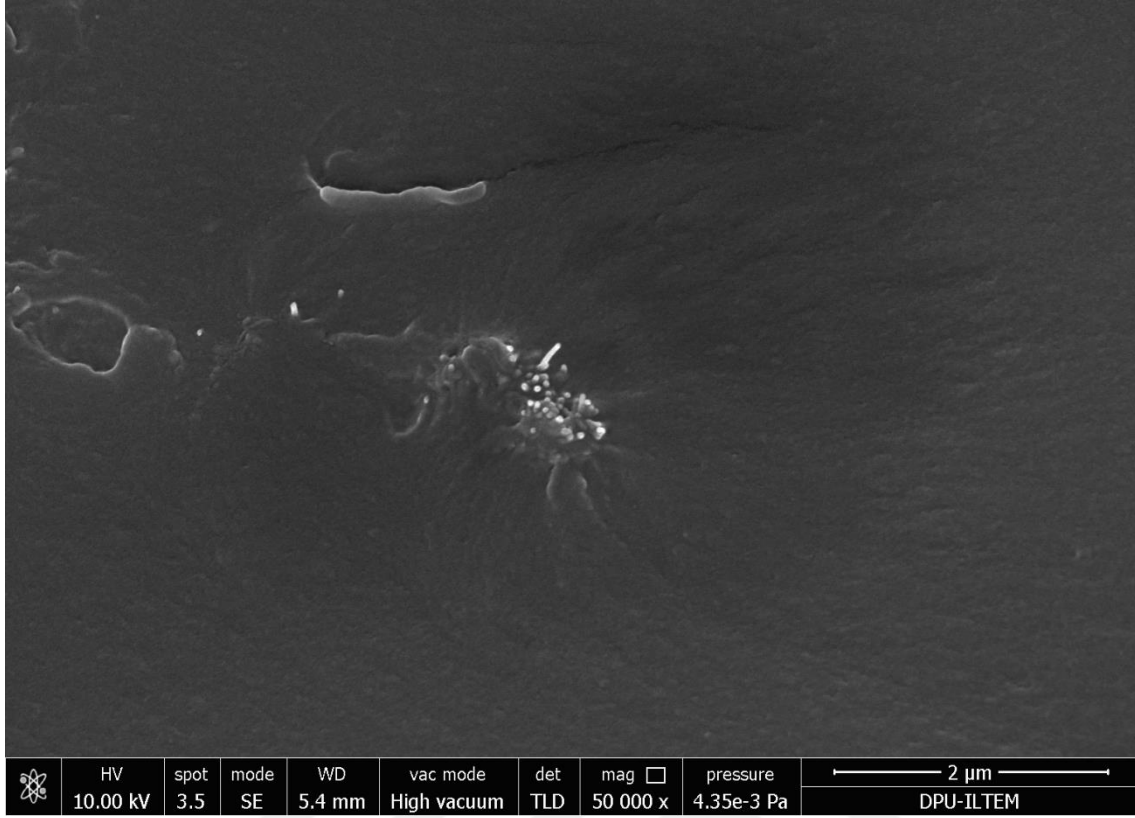
Nanokil içeren numunelerin SEM fotoğraflarına bakıldığında nanokil oranının arttıkça öbekleşmelerin arttığı hatta aglomerasyonların görüldüğü belirlenmiştir. Artan nano parçacık miktarının epoksinin viskozitesini arttırması sonucunda dağılımın kötüleştiği açıktır. Bu sonuç elektriksel ve termal iletkenlik sonuçları ile örtüşmektedir.



Şekil 5.14 %0.6 CNT %0.5 nanokil içeren numunenin SEM görüntüsü.



Şekil 5.15 %1 CNT %0.5 nanokil içeren numunenin SEM görüntüsü.



Şekil 5.16 %0,5 CNT ve %1 nanokil içeren numunenin SEM görüntüsü.

Bu çalışmada, CNT takviyeli epoksi matrisli kompozit malzemede CNT dağılımının iyileştirilmesi için disperse ajanı ve nanokil kullanılarak farklı oranlarda içeriğe sahip deney grupları oluşturulmuş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır;

- 1)Disperse ajanı olarak kullanılan amino silan bağlayıcı olan Lavidasil 112'nin (N-(2-Aminoethyl-3-aminopropyl)trimethoxysilane) CNT dağılımını iyileştirerek elektriksel ve termal iletkenliğin artmasında etkili olduğu sonucuna varılmıştır.
- 2)Disperse ajanının miktarının etkisini belirlemek için yapılan 1 ml ve 2 ml'lik deney gruplarından elde edilen sonuçlara göre 1 ml disperse ajanının yüksek CNT içeriklerinde yeterli olmadığı, 2ml disperse ajanının ise en yüksek içerik olan %1'lik CNT takviyesinde daha etkili olduğu görülmüştür. Gelecekteki çalışmalarda disperse ajanının ve CNT'ün daha farklı miktarlarda kullanıldığı deney grupları oluşturularak optimum miktar bulunmaya çalışılabilir.
- 3) Nanokilin varlığının da yarattığı sinerjik etkiye dayanarak CNT aglomerasyonunu engellediği böylece termal ve elektriksel iletkenliği arttırdığı sonucuna varılmıştır.

4) Nanokil her ne kadar düşük oranlarda dağılımı iyileştirse de katkı oranı arttıkça epoksinin viskozitesinin artmasından kaynaklanan dağılım sorunları olduğu bunun da iletkenlikleri düşürdüğü gözlemlenmiştir.

5) CNT dağılımları SEM görüntüleri ile incelenmeye çalışılmış ve sonuçlar elde edilen termal ve elektriksel iletkenlik sonuçları ile tutarlı çıkmıştır. Ancak SEM görüntüleri alınırken epoksi içerisindeki killer görüntülenememiştir. Gelecekteki çalışmalarda bunun için farklı analiz çalışmaları yapılabilir.



6. KAYNAKLAR

- Anonim, 2020, Composites Turkey, Kompozit Sanayiciler Derneği, Yayın no: 27, İstanbul.
- Ashrafi B, Guan J, Mirjalili V, Zhang Y, Chun L, Hubert P, Johnston A, 2011, Enhancement of mechanical performance of epoxy/carbon fiber laminate composites using single-walled carbon nanotubes. *Composites Science and Technology*, 71, 1569–1578.
- Bakshi S R, Lahiri D, Agarwal A. 2010, Carbon nanotube reinforced metal matrix composites – a review. *International Materials Reviews*, 55 , 41-64.
- Baughman R H, Zakhidov A A, de Heer W A, 2002, Carbon nanotubes--the route toward applications. *Science*, 297, 787-792.
- Che J, Jing M, Liu D, Wang K, Fu Q, 2018, Largely enhanced thermal conductivity of HDPE/boron nitride/carbon nanotubes ternary composites via filler network-network synergy and orientation, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 112, 32–39.
- Çelik S, Gür Y, 2021, Üç boyutlu yazıcı ile üretilen ABS ve karbon fiber takviyeli ABS kompozitlerde üretim parametrelerinin mekanik özelliklere etkisi DOI: 10.25092/baunfbed.847864 Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi.
- Dai H, Qian D, Lu J, Zhang L, Wang Z, and Lieber C M, 2005, "Directed growth and assembly of single-walled carbon nanotubes." *Nature nanotechnology*, 1(1), 1-6. DOI: 10.1038/nnano.2004.216.
- Due J, Robinson A J, 2013, Reliability of thermal interface materials: A review. *Applied Thermal Engineering*, 50, 455–463.
- Esen Z E, 2018, Effect of Graphene Nanoplatelets on the Electrical Conductivity of Polymer-Based Composites. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi.

- Florez S, Gaztelumendi I, Gayosa J, 2016, Improvement of the electrical isotropy of composite structures-overview Wölcken, P., Christof, P., (Eds.), MichaelSmart intelligent aircraft structures (saristu), Springer, London, 805-814.
- Güler K A, 2003, Uçak Yapımında Kullanılan Malzemeler ve Özelliklerinin İncelenmesi, Bitirme Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Harris D N, Sass T R, 2011, Fatigue behavior of carbon nanotubes. Journal of Public Economics, 95, 798-812.
- Hsiao K-T, Advani S G, 2012, Manufacturing techniques for polymer matrix composites (PMCs). Elsevier.
- Hu N, Yang M, Zhang B, Chen X, Liu Y, 2015, Dispersion and alignment of carbon nanotubes and graphene in polymer matrix: A review. Composites Part B: Engineering, 76, 1-16.
- Karabacak K, Çavuş İ, Kıyılı O, 2022, Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, Cilt 27, Sayı 3, 1249-1250.
- Mehra N, Mu L, Ji T, Yang X, Kong J, Gu J, Zhu J, 2018, Thermal transport in polymeric materials and across composite interfaces, Applied Materials Today, 12, 92–130.
- Ogasawara T, Hirano Y, and Yoshimura A, 2010, Coupled thermal–electrical analysis for carbon fiber/epoxy composites exposed to simulated lightning current. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 41: 973–981.
- Pul M, 2019, Karbon Nanotüp (CNT) Ve Nano Grafen (G) Takviyeli Al 2024 Kompozitlerin Vorteks Yöntemiyle Üretilerek Aşınma Ve İşlenebilme Özelliklerinin İncelenmesi, Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi, 31/01/2019, 11/1, 371-373.
- Raghul R, Singh V, Awasthi V K, 2016, Effect of nanoclay addition on the mechanical properties of glass fiber reinforced epoxy matrix composites. Composites Part B: Engineering, 95, 141-147.

- Rajendran K S, Krishnan K M, Krishnan M R A, Rajan S S, & Babu S P S, 2013, Effect of boron nitride loading on the thermal conductivity of high-density polyethylene composites. *Ceramics International*, 39, 569-573.
- Siddiqui NA, Sham M L, Tang B Z, Munir A, Kim J K, 2009, Tensile strength of glass fibres with carbon nanotube-epoxy coating. *Compos Part A* 2009;40:1606–14.
- Sönmez M, Şatır S, 2009, Polimer Matrisli Kompozitlerin Endüstri Ürünleri Tasarımında Önemi ve Geleceği: Türkiye’den Dört Örnek Firma Üzerine Bir İnceleme, 502041960, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Töre C, 2011, Kompozit Malzeme Temelleri Polimer Matrisli., 1-4, 133 MMO/552 TMMOB Makine Mühendisleri Odası Yay. Türkiye.
- Wu S Y, Huang Y L, Ma C C.M, Yuen S M, Teng C C, Yang S Y, 2011, Mechanical, thermal and electrical properties of aluminum nitride/polyetherimide composites, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 42, 1573–1583.
- Yuen S-M, Ma C M, Chuang C, Yu K-C, Wu S-Y, Yang C, Wei M, 2008, Effect of processing method on the shielding effectiveness of electromagnetic interference of MWCNT/PMMA composites, *Compos Sci. Technol.*, 68: 963-968.
- Zhao Q, Song J, Wang X, Shi J, Wu W, 2018, Effects of carbon nanotubes on electrical conductivity of graphene/epoxy composites. *International Journal of Engineering Science and Technology*, 10, 3373-3379.

İnternet Kaynakları

- 1- <https://m.aircraftspruce.com/catalog/pdf/mgs285tech.pdf>, 20.04.2023
- 2- <https://bilsenbesergil.blogspot.com/p/karbon-nanotup-carbon-nanotube.html> 02.08.2023
- 3- <https://shop.nanografi.com.tr/ultrasonik-homogenizator/>, 05.06.2023
- 4- <https://www.kompozitshop.com/mgs-laminasyon-epoksi-seti-l285h287> 05.06.2023
- 5- <https://nanografi.com/carbon-nanotubes/cooh-functionalized-multi-walled-carbon-nanotubes-purity-96-outside-diameter-8-18-nm/> 05.06.2023
- 6- https://scdn.rohdeschwarz.com/ur/pws/dl_downloads/dl_common_library/dl_brochures_and_datasheets/pdf_1/Fact_sheet_-_HM8118_v2.00.pdf, 05.06.2023
- 7- <https://www.swiss-composite.ch/pdf/t-Epoxyd-Harz-L-285-LF-e.pdf> 02.08.2023



