EÜ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

EGE ÜNİVERSİTESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

KOMPOZİT UÇAK YAPILARINDA ELEKTRİK İLETKENLİĞİNİN NANOTEKNOLOJİK OLARAK İYİLEŞTİRİLMESİ

Gözde BERKAY

Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Seçkin ERDEN

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Sunuş Tarihi : 24.12.2015

Bornova-İZMİR

2015

EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

(YÜKSEK LİSANS TEZİ)

KOMPOZİT UÇAK YAPILARINDA ELEKTRİK İLETKENLİĞİNİN NANOTEKNOLOJİK OLARAK İYİLEŞTİRİLMESİ

Gözde BERKAY

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Seçkin ERDEN

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Sunuş Tarihi: 24.12.2015

Bornova-İZMİR

2015

Gözde BERKAY tarafından Yüksek Lisans tezi olarak sunulan "Kompozit Uçak Yapılarında Elektrik İletkenliğinin Nanoteknolojik Olarak İyileştirilmesi" başlıklı bu çalışma EÜ Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği ile EÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Eğitim ve Öğretim Yönergesi'nin ilgili hükümleri uyarınca tarafımızdan değerlendirilerek savunmaya değer bulunmuş ve 24.12.2015 tarihinde yapılan tez savunma sınavında aday oybirliği/oyçokluğu ile başarılı bulunmuştur.

Jüri Üyeleri:		**İmza**
Jüri Başkanı	: Başak Özden, Yrd. Doç. Dr.	.....
Raportör Üye	: Ömer Mermer, Yrd. Doç. Dr.	.....
Üye	: Özgür Seydibeyoğlu, Doç. Dr.	.....

EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

EÜ Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin ilgili hükümleri uyarınca Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum "Kompozit Uçak Yapılarında Elektrik İletkenliğinin Nanoteknolojik Olarak İyileştirilmesi" başlıklı bu tezin kendi çalışmam olduğunu, sunduğum tüm sonuç, doküman, bilgi ve belgeleri bizzat ve bu tez çalışması kapsamında elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara atıf yaptığımı ve bunları kaynaklar listesinde usulüne uygun olarak verdiğimi, tez çalışması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını, bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya diğer bir üniversitede başka bir tez çalışması içinde sunmadığımı, bu tezin planlanmasından yazımına kadar bütün safhalarda bilimsel etik kurallarına uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul edeceğimi beyan ederim.

24 / 12 / 2015

İmzası

Adı-Soyadı

Gözde BERKAY

ÖZET

KOMPOZİT UÇAK YAPILARINDA ELEKTRİK İLETKENLİĞİNİN NANOTEKNOLOJİK OLARAK İYİLEŞTİRİLMESİ

BERKAY, Gözde

Yüksek Lisans Tezi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Seçkin ERDEN
Aralık 2015, 60 sayfa

Yüksek performanslı iplik takviyeli polimerik kompozit malzemeler, yüksek mekanik dayanım, boyutsal ve ısıl kararlılık, sertlik, aşınma dayanımı ve düşük yoğunluk gibi özellikleri ile pek çok avantaj sunar. Ancak elektriksel özellikleri göz önüne alındığında, polimerik kompozitlerdeki reçine malzemelerinin metallere göre ancak %1 kadar iletim özelliğine sahip olduğu söylenebilir. İpliklerin ise, yüksek iletim özellikleri vardır. Kompozit içindeki takviye şekli ve doğrultusu ile elektrik akım yönü arasındaki açı önemlidir.

Bu çalışmada, elektriksel özelliklerin geliştirilmesi amacıyla, termoset bir reçine olan epoksiye, farklı miktarlarda grafen nanoparçacıklar ve karbon nanotüpler eklenmiştir. Üretilen bu nanoparçacık katkılı karbon/epoksi tabakalı kompozitlerdeki elektriksel iletkenliğin değişimi, iplik doğrultusunda, iplik doğrultusuna dik ve kalınlık doğrultusunda incelenmiştir. Elektriksel iletkenlik yanında üretilen kompozitlerin tabakalar arası kayma mukavemeti de incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: polimerik matrisli kompozitler, elektriksel özellikler, epoksi, karbon nanotüp, grafen, karbon iplik, ILLS

ABSTRACT

IMPROVEMENT OF ELECTRICAL CONDUCTIVITY IN AIRCRAFT COMPOSITE STRUCTURES BY NANO TECHNOLOGY

BERKAY, Gözde

MSc in Mechanical Eng.
Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Seçkin ERDEN
December 2015, 60 pages

High-performance fiber reinforced polymeric composite materials offer many advantages such high mechanical strength, dimensional and thermal stability, hardness, wear resistance and low density properties. However, when considering the electrical properties, the resin material in the polymeric composite has only only 1% conductivity properties according to metals. The fibers have high transmission characteristics. The reinforcement shape and direction of fiber with the angle between the electric current direction is important.

In this study, in order to improve the electrical properties, varying amounts of carbon nanotubes and graphene nanoparticles was added in the thermoset epoxy resin. The change in electrical conductivity of these manufactured nanoparticles reinforced carbon / epoxy laminated composite was examined in the direction of the fiber, in the other direction and thickness direction. Alongside electrical conductivity, interlaminar shear strength of the produced composite were investigated.

Keywords: polymeric matrix composites, electrical properties, epoxy, carbon nanotube, graphene, carbon fiber, ILLS

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın başlangıcından bitimine kadar her aşamada çalışmayı yönlendiren, özverili yardımlarını esirgemeyen Yrd. Doç. Dr. Seçkin ERDEN'e, deney ve test aşamalarında değerli katkılarda bulunan Arş.Gör.Y.Müh.B.Oğuz GÜRSES' e, Kimya Müh. Ferda ÖNEN' e, Makine Müh. Semih Kıral' a ve bu çalışmanın gerçekleşmesinde burs desteği sağlayan TÜBİTAK 2211 Yurt İçi Lisansüstü Programı' na teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET vii
ABSTRACT ix
TEŞEKKÜR xi
ŞEKİLLER DİZİNİ xv
ÇİZELGELER DİZİNİ xvii
SİMGELER VE KISALTMALAR xviii

1. GİRİŞ 1
2. KOMPOZİT MALZEMELER 2
2.1. Kompozit Malzeme Bileşenleri 3
2.1.1. Takviye malzemeleri 4
2.1.2. Matris malzemeleri 8
2.2. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması 12
2.2.1. Polimer matrisli kompozitler 13
2.2.2. Fiber takviyeli polimer kompozitler 14
2.2.3. Tabakalı kompozitler 15
2.3. Nano yapılar 17
2.3.1. Nano yapıların özellikleri 17
2.3.2. Karbon nanotüpler 21
2.3.3. Grafen 23
3. UÇAK YAPILARINDA KULLANILAN KOMPOZİT MALZEMELER 25
3.1. Kompozit Uçak Yüzeyinde Elektrik İletkenliği 29
3.2. Nanoparçacık Katkısının Elektriksel Özelliklere Etkisi 31

İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR 34
4.1. Malzemeler ve Özellikleri 34
4.1.1. Karbon fiber 34
4.1.2. Epoksi ve sertleştirici 35
4.1.3. Nanoparçacıklar 36
4.2. Yöntem 37
4.2.1. Grafen oksidasyon işlemi 38
4.2.2. Kompozit üretimi 40
4.2.3. Testler 48
5. BULGULAR 52
5.1. Elektriksel İletkenlik Test Bulguları 52
5.2. Kısa Kiriş Kayma Test Bulguları 55
6. SONUÇ 57
KAYNAKLAR DİZİNİ 58

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil Sayfa

Şekil 2-1 Matris Bileşenleri 4
Şekil 2-2 Karbon, grafit, cam ve aramid kumaşlar 5
Şekil 2-3 Poliakrilnitril liflerinden karbon fiber üretimi (Yaman et al., 2006) 6
Şekil 2-4 Taş kömürü Katranı ve zifften karbon lif üretimi (Yaman et al., 2006) .. 6
Şekil 2-5 a) Fiber Takviyeli Kompozit b) Parçacık Takviyeli Kompozit c)Tabakalı Kompozit 12
Şekil 2-6 Uçak ve uzay endüstrisinde kullanılan polimerik kompozitler (Kaya, 1987) 13
Şekil 2-7 Fiber takviyeli polimer kompozit oluşumu 15
Şekil 2-8 Tabakalı kompozit yapısı 15
Şekil 2-9 Tabakalı kompozitlerde fiber oryantasyonu 16
Şekil 2-10 AV-8B uçağında kullanılan tabakalı kompozitler (Baker et al., 2004) 16
Şekil 2-11 Üç Tip Tek-Duvarlı Karbon Nano Tüpün Üç Boyutlu Modeli (Sharifzadeh, M. 2006) 22
Şekil 2-12 Karbon atomu allotropları (Neto vd. 2006) Sol üst: grafen; sağ üst: grafit; sol alt: nanotüp; sağ alt: fullerene. 23
Şekil 3-1 Ticari uçaklarda kullanılan kompozitler - Boeing 727 (Kaya, 1987) ... 25
Şekil 3-2 Askeri uçaklarda kullanılan kompozitler - AV-8B (Kaya, 1987) 26
Şekil 3-3 Uçaklarda elektrik akım yönü (Özel ve Töre, 2007) 30
Şekil 3-4 Elektriksel iletkenlik değerleri ve perkolasyon teorisi 31
Şekil 4-1 Sem resmi (A-12 Grafen Toz) 37
Şekil 4-2 Grafen oksidasyon işlem şeması 39
Şekil 4-3 Grafen oksidasyonu 40
Şekil 4-4 Kompozit üretim şeması 40
Şekil 4-5 Galvaniz çeliklere fiber sarma işlemi 41
Şekil 4-6 Galvaniz çeliğe sarılan fiber ölçüleri 41
Şekil 4-7 Matris modifikasyon şeması 42
Şekil 4-8 Ultrasonik Homojenizatör 43
Şekil 4-9 Aseton uçurma işlemi sonrası nanoparçacıklar 43
Şekil 4-10 Fiber sarma ve ıslatma işlemi 44
Şekil 4-11 Jelleşme için etüve koyulan prepregler 44
Şekil 4-12 Kalıp tasarımı 45
Şekil 4-13 Kalıptan çıkarılacak olan kompozit tasarımı 45
Şekil 4-14 Kalıp imalatı 46

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

Şekil Sayfa

Şekil 4-15 Kalıba koyulan tabakalı kompozitlerin ısıtmalı press yardımıyla üretimi 47
Şekil 4-16 Kalıptan çıkarılan kompozitlerin test aşaması için kesim işlemi 47
Şekil 4-17 Elektriksel iletkenlik test için numune ölçüm yönleri 48
Şekil 4-18 Elektriksel test a-) Fiber yönü b-)Fibere dik c-) Kalınlık doğrultusu..48
Şekil 4-19 Elektriksel iletkenlik hesaplanması 49
Şekil 4-20 ILLS testi için numune kesim işlemi 50
Şekil 4-21 ILLS testi 50
Şekil 4-22 ILLS testi uygulaması.....51

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge Sayfa

Çizelge 2-1 Karbon fiberlerin özellikleri (Agarwal, 2006) 7
Çizelge 2-2 Termoset ve termoplastik arasındaki genel farklılıklar (Peters, 1998) 10
Çizelge 2-3 Bazı matris malzemelerinin özellikleri (Aran ve Afacan, 1988) 12
Çizelge 2-4 Nanoparçacıkların En Fazla Yararlanılabilen Özellikleri (Willems and van der Willenberg 2005) 18
Çizelge 3-1 Yapısal Uçak Malzemelerinin Mekanik Özellikleri (Arıcan, 2003) .. 26
Çizelge 3-2 İleri Kompozitlerle Uçak Elemanı Bazında Sağlanan Ağırlık Kazançları (Arıcan,2003) 27
Çizelge 3-3 A310 A320 uçaklarında kompozit uygulaması (Arıcan, 2003) 28
Çizelge 3-4 Askeri uçaklarda kompozit yapılar (Arıcan, 2003) 28
Çizelge 3-5 Uçak yapılarında kullanılan malzemelerin direnç değerleri (Özel ve Töre, 2007) 30
Çizelge 3-6 Karbon nanotüplerin polimer matrislere göre perkolasyon eşik değerleri 32
Çizelge 4-1 AKSA kaplamalı karbon fiber özellikleri 34
Çizelge 4-2 Epoksi - sertleştirici özellikleri 35
Çizelge 4-3 Karbon nanotüp özellikleri 36
Çizelge 4-4 Grafen özellikleri 37
Çizelge 4-5 Üretilen kompozitlerin isimlendirilmesi 38
Çizelge 5-1 Fiber yönü elektriksel iletkenlik değerleri 52
Çizelge 5-2 Fiber yönüne dik doğrultuda elektriksel iletkenlik değerleri 53
Çizelge 5-3 Kalınlık doğrultusunda elektriksel iletkenlik değerleri 53
Çizelge 5-4 Kompozitlerin iletkenlik değer aralıkları ve ilgili referanslar ile karşılaştırılması 54
Çizelge 5-5 Kısa kiriş kayma test (ILLS) değerleri 55

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
ν	Hacim (cm3)
m	Kütle(gr)
ρ	Yoğunluk (gr/cm^3)
A	Yüzey alanı (mm^2)
b	En (mm)
a	Boy (mm)
t	Kalınlık (mm)
l	Uzaklık (mm)
R	Direnç (Ω)
σ	Elektriksel iletkenlik (S/mm)
F	Kayma kuvveti (N)
τ	Kayma Mukavemeti(N/mm^2)

Kısaltmalar

CNT	Karbon nanotüp
GO	Grafen oksit
MWCNT	Çok duvarlı karbon nanotüp
DWCNT	Çift duvarlı karbon nanotüp

1. GİRİŞ

Dünyada gelişen teknoloji ile birlikte mühendislik uygulamalarında malzeme biliminin yeri gün geçtikçe artmaktadır. Artık günümüzde malzeme bilimi tek bir mühendislik dalı olmaktan çıkmış, alt branşları olan metaller, ametaller, kimyasallar, organikler, inorganikler, polimerler vb. gibi kollara ayrılmıştır. Kompozit malzemeler ise bu gruplar içinde en önemlilerinden biri olarak çok geniş bir uygulama sahasına sahiptir. Otomotiv, tekstil, uzay ve roket sanayi, denizcilik ve havacılık gibi endüstri kolları, sürekli gelişen kompozit malzemelerin önemini benimsemişlerdir.

Havacılığın I. Dünya Savaşı ve sonrasında II. Dünya Savaşı sonunda hızla gelişmesiyle havacılıkta malzemeye olan ihtiyacın türü değişmeye başlamıştır. Uçaklarda kullanılan malzemelerin hafif olmalarının öneminin büyük olması, uçakların daha hızlı uçabilmesinin, menzillerinin daha uzun, yakıt sarfiyatının daha az olabilmesinin yolunun hafiflikten, hafifliğin yolunun ise kullanılan malzemeden geçmekte olduğuna işaret etmiştir. İşte bu sebeple, yüksek dayanımdan ödün vermeden, hafif ve uzun ömürlü malzemelerin, halen devam etmekte olan gelişim, üretim ve kullanım ihtiyacı ortaya çıkmıştır. Havacılığın hızlı gelişimi ve doğan bu malzeme ihtiyacı, kompozit malzemeleri havacılıkta en çok kullanılan malzeme durumuna getirmiştir.

Bir uçağın uçuş boyunca harcadığı yakıtın %55'i kalkış, iniş ve manevralarıyla, %45'i ise düz uçuşta harcanmaktadır. Kompozit malzeme kullanımıyla günümüzde varılabilen %20-30'luk ağırlık kazancı, harcanan yakıtta %50'lere varılabilen bir azalma getirmiş, ayrıca uçak aldığı yakıtla eskine göre yaklaşık olarak %20 daha düz bir uçuş yapabilecektir. Bu avantajlarıyla kompozit malzemeler günümüzde birincil yapılar da dahil olmak üzere, birçok uçak elemanında kullanılmaktadır. Kompozit çeşidi olarak genellikle takviyeli reçineler ve sandviç yapıların seçildiği görülmektedir. Gelişen teknoloji ile birlikte, özellikle hava-uzay yapı elemanlarında kullanılan kompozitler klasik tür karma malzemeden ayrılarak, "İleri Kompozit Malzemeler" ismini almış, bu zaman çerçevesinde Cam Elyaflı Kompozit Malzemeler (GFRP-Glass Fiber Reinforced Plastics), Karbon Fiber Takviyeli Plastik Malzemeler (CFRP - Carbon Fiber Reinforced Plastics) gibi malzemeler geliştirilmiştir. Uçak malzemelerini geliştirmeye yönelik bu çalışmalar, diğer uygulama alanlarındaki gelişmelerde de büyük rol oynamaktadır.

2. KOMPOZİT MALZEMELER

Kompozit malzeme, kimyasal bileşenleri farklı birbiri içerisinde pratik olarak çözünmeyen iki veya daha fazla malzemenin kullanım yerindeki aranan özellikleri verebilecek daha uygun malzeme oluşumu için makro seviyede birleştirilmesi sonucu meydana gelen malzemelerdir. Mikroskobik açıdan heterojen bir malzeme özelliği göstermekte, ancak makroskobik açıdan homojen bir malzeme gibi davranmaktadır (Kazanç, 2002).

Kompozit malzemelerin birçok özelliklerinin metallerinkine göre çok farklılıklar göstermesinden dolayı, metal malzemelere göre önem kazanmışlardır. Kompozitlerin özgül ağırlıklarının düşük oluşu hafif konstrüksiyonlarda kullanımda büyük bir avantaj sağlamaktadır. Bunun yanında, fiber takviyeli kompozit malzemelerin korozyona dayanımları, ısı, ses ve elektrik izolasyonu sağlamaları da ilgili kullanım alanları için bir üstünlük sağlamaktadır. Aşağıda bu malzemelerin avantajlı olan ve olmayan yanları kısaca ele alınmıştır. Kompozit malzemelerin dezavantajlı yanlarını ortadan kaldırmaya yönelik teorik çalışmalar yapılmakta olup, bu çalışmaların olumlu sonuçlanması halinde kompozit malzemeler metalik malzemelerin yerini alabilecektir (Bilgin, 2005).

Yüksek Mukavemet: Kompozitlerin çekme ve eğilme mukavemeti birçok metalik malzemeye göre çok daha yüksektir. Ayrıca kalıplama özelliklerinden dolayı kompozitlere istenen yönde ve bölgede gerekli mukavemet verilebilir. Böylece malzemeden tasarruf yapılarak, daha hafif ve ucuz ürünler elde edilir.

Elektriksel Özellikler: Uygun malzemelerin seçilmesiyle çok üstün elektriksel özelliklere sahip kompozit ürünler elde edilebilir. Bugün büyük enerji nakil hatlarında kompozitler iyi bir iletken ve gerektiğinde de başka bir yapıda, iyi bir yalıtkan malzemesi olarak kullanılabilirler.

Korozyona ve Kimyasal Etkilere Karşı Mukavemet: Kompozitler, hava etkilerinden, korozyondan ve çoğu kimyasal etkilerden zarar görmezler. Bu özellikleri nedeniyle kompozit malzemeler kimyevi madde tankları, boru ve aspiratörler, tekne ve diğer deniz araçları yapımında güvenle kullanılmaktadır. Özellikle korozyona karşı mukavemetli olması, endüstride birçok alanda avantaj sağlamaktadır.

Isıya ve Ateşe Dayanıklılığı: Isı iletim katsayısı düşük malzemelerden oluşabilen kompozitlerin ısıya dayanıklılık özelliği, yüksek ısı altında 5

kullanılabilmesine olanak sağlamaktadır. Bazı özel katkı maddeleri ile kompozitlerin ısıya dayanımı arttırılabilir.

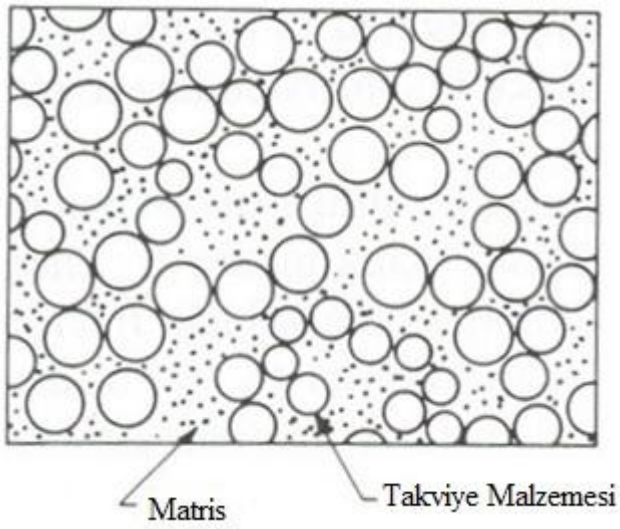
Titreşim Sönümlendirme: Kompozit malzemelerde süneklik nedeniyle doğal bir titreşim sönümleme ve şok yutabilme özelliği vardır. Çatlak yürümesi olayı da böylece minimize edilmiş olmaktadır.

Bütün bu olumlu yanların dışında kompozit malzemelerin uygun olmayan yanları da şu şekilde sıralanabilir:

- Kompozit malzemelerdeki hava zerrecikleri malzemenin yorulma özelliklerini olumsuz etkilemektedir.
- Kompozit malzemeler değişik doğrultularda değişik mekanik özellikler gösterirler.
- Aynı kompozit malzeme için çekme, basma, kesme ve eğilme mukavemet değerleri farklılıklar gösterir.
- Kompozit malzemelerin delik delme, kesme türü operasyonları liflerde açılmaya neden olduğundan, bu tür malzemelerde hassas imalattan söz edilemez.

2.1. Kompozit Malzeme Bileşenleri

Kompozit malzemelerde çekirdek olarak kullanılan bir takviye malzemesi bulunmakta, bu malzemenin çevresinde hacimsel olarak çoğunluğu oluşturan bir matris malzeme bulunmaktadır. Bu iki malzeme grubundan, takviye malzemesi kompozit malzemenin mukavemet ve yük taşıma özelliğini, matris malzeme ise plastik deformasyona geçişte oluşabilecek çatlak ilerlemelerini önleyici rol oynamakta ve kompozit malzemenin kopmasını geciktirmektedir. Matris olarak kullanılan malzemenin bir amacı da takviye malzemelerini yük altında bir arada tutabilmek ve yükü lifler arasında homojen olarak dağıtmaktır. Böylece takviye malzemelerinde plastik deformasyon gerçekleştiğinde ortaya çıkacak çatlak ilerlemesi olayının önüne geçilmiş olur.



Şekil 2-1 Matris Bileşenleri

2.1.1. Takviye malzemeleri

Matris içerisine yayılmış durumda bulunan ana kompozit elemanlarındandır. Kompozit içindeki başlıca görevleri:

- Yükü taşımaktır. Yapısal kompozitlerde yükün %70 ila 90' ı takviye malzemeleri tarafından taşınır.
- Kompozite rijitlik, dayanım, ısıl kararlılık ve diğer yapısal özellikleri kazandırır.
- Kullanılan takviye türüne bağlı olarak elektrik iletkenliği veya yalıtkanlığı sağlar (Sanjay, 2001)

Kompozit malzemelerde kullanılan başlıca takviye malzemeleri türleri; (Şekil 2)

- 1-Cam fiber,
- 2-Karbon (Graphite) fiber, (PAN –polyacrylonitrile- ve zift kökenli)
- 3-Aramid (Aromatic Polyamid) fiber, (Ticari ismi; Kevlar)
- 4-Bor fiber,
- 5-Oksit fiber,
- 6-Yüksek yoğunluklu polietilen fiber,
- 7-Poliamid fiber,
- 8-Polyester fiber,

- 9-Doğal organik fiberler

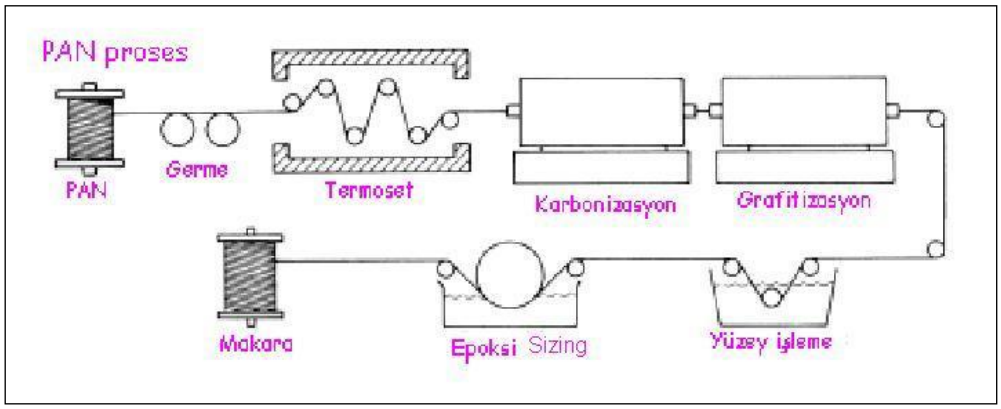
Şekil 2-2 Karbon, grafit, cam ve aramid kumaşlar

Bu çalışmada takviye malzeme çeşitlerinden karbon fiber ile çalışılmıştır. Konunun devamında karbon fiberle ilgili var olan kaynak ve belgeler taranıp, sunulmuştur.

2.1.1.1. Karbon fiber

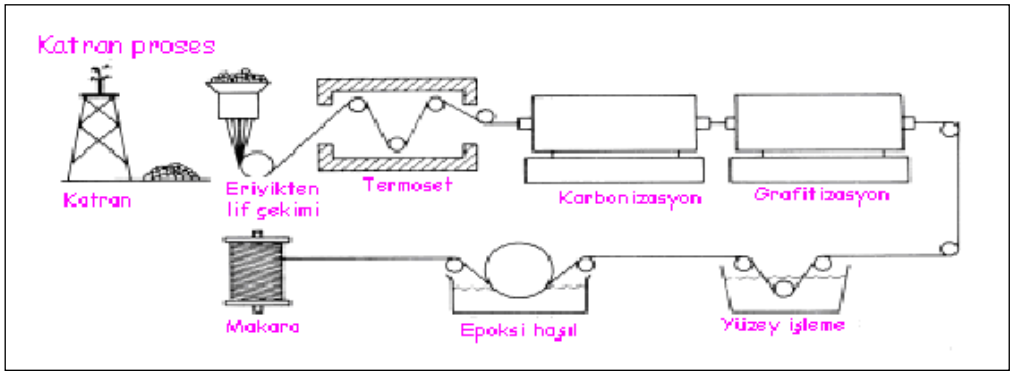
Karbon fiberler organik lif çıkış maddelerinin termal olarak karbürlenmesiyle elde edilmiş, karbon yüzdesi kütlece en az % 90 olan lif türüdür (TS 1188 ISO 2076, 2002).

Karbon fiberler üç farklı yöntem kullanılarak üretilmekte ve fiber üretim yöntemine göre adlandırılmaktadır. Her bir yöntemin fiyat ve özellik üzerinde farklı avantajları ve dezavantajları vardır. PAN(Poliakrilnitril) karbon fiberlerin maliyetleri daha düşüktür ve iyi özelliklere sahiptir. Yapısal karbon fiberler grubuna dahildir ve askeri havacılıkta, füzelerde ve uzay araçlarında yaygın olarak kullanılmaktadır (Şekil 2-3) .



Şekil 2-3 Poliakrilnitril liflerinden karbon fiber üretimi (Yaman et al., 2006)

Zift karbon fiberleri, daha yüksek rijitlik ve ısıl iletkenliğe sahiptirler ve nedenle uydu yapıları ve uzay radyatörleri ve elektronik muhafazaları gibi ısıl-yönetim uygulamalarında kullanılmaktadırlar.



Şekil 2-4 Taş kömürü Katranı ve ziftten karbon lif üretimi (Yaman et al., 2006)

Selüloz karbon fiberleri yapısal uygulamalarda kullanılmamaktadır, fakat düşük ısıl iletkenlikleri onları roket nozulları, roket uçlarında ve ısı kalkanları gibi yalıtım ve yön verici uygulamalarda kullanışlı yapmaktadır (Agarwal, 2006).

Karbon ve Grafit elyaflar organik maddelerden üretildikleri için organik fiberler olarak da adlandırılırlar. Ham madde olarak Poliakrilonitril (polyacrylonitrile, PAN), Selüloz (Rayon) ve Zift (Pitch) kullanılır. Poliakrilonitril (PAN), tekstil kaynaklı bir polimer fiberdir. Zift fiberler arıtılmış petrolden veya katran şeklindeki kömür ziftinden eğrilerek elde edilir. Karbon fiber/elyaf üretiminde günümüzde daha çok PAN-esaslı fiberlerden yararlanılmaktadır. Zift-esaslı fiberler daha direngen ve gevrek bir karaktere sahiptirler. Ham lifleri karbon lif/elyaf haline getirmek için birkaç basamaklı bir proses uygulanır. İlk aşamada, yüksek sıcaklıklarda oksitlenme işlemine tabi

tutulurlar. Daha sonra, karbürleme ve grafitleme proseslerine tabi tutulurlar (Şekil 2-4).

Çizelge 2-1 Karbon fiberlerin özellikleri (Agarwal, 2006)

Özellik, birim	**Yöntem**		
	PAN	**Zift**	**Selüloz**
Çekme dayanımı, MPA	1925-6200	2275-4060	2070-2760
Çekme modülü, GPA	230-595	170-980	415-550
Yoğunluk, g/cm^3	1.77-1.96	2.0-2.2	1.7
Uzama,%	0.4-1.2	0.25-0.7	-
Isı genleşme Katsayısı			
Eksenel, 10^{-6}/ °C	-0.75 ila -0.4	-1.6 ila -0.9	-
Enine , 10^{-6}/ °C	7-10	7.8	-
Isıl iletkenlik, W/Mk	20-80	400-1100	-
Fiber çapı, μm	5-8	10-11	6.5

Tablo 2-1' de her karbon fiber sınıfının tipik özellik aralıkları verilmiştir. Karbon fiberler, üretim prosesiyle (örneğin; ısıl işlem sıcaklığı) yapıları kontrol edilerek özellikleri kolaylıkla değiştirilebilir olmasından dolayı çok çeşitli özelliklerde bulunabilmektedir. Fiber özellikleri harmandan harmana ve ayrıca üreticinin fiber teknolojisini geliştirmesine bağlı olarak değişmektedir. Özel

fiberler ve bunların gerçek özellikleri için üreticinin en son verilerine danışılmalıdır (Agarwal, 2006).

Karbon fiberlere çok benzeyen bir başka yapı ise grafit fiberlerdir. Karbon fiberler %93 ila %95 arasında karbon ihtiva ederken, grafit fiberler %99'dan daha yüksek karbon içeriğine sahiptir. Ayrıca grafit fiberler çok daha yüksek sıcaklıklarda üretildiğinden karbon fiberden daha pahalıdır (Autar, 2006).

Grafit fiberler genellikle uçak parçaları gibi yüksek modül ve yüksek dayanım uygulamalarında kullanılmaktadır. Avantajları yüksek özgül dayanım ve modül, düşük ısıl genleşme ve yüksek yorulma dayanımıdır. Dezavantajları ise yüksek maliyet, düşük darbe dayancı ve yüksek elektrik iletkenliği olarak sıralanmaktadır (Autar, 2006).

2.1.2. Matris malzemeleri

Takviye malzemeleri ile karşılaştırıldıklarında matrisler genellikle düşük mekanik özelliklere sahip olsalar da kompozitin pek çok mekanik özelliklerini matris etkiler. Bu özellikler; enine modül ve dayanımı, kesme modülü ve dayanımı, basma dayanımı, tabakalar arası (interlaminar) kesme dayanımı, ısıl genleşme katsayısı ve yorulma dayanımını içermektedir (Autar, 2006). Kompozit yapılarda yükü taşıyan takviye malzemelerinin fonksiyonlarını yerine getirmeleri açısından matrisin mekanik özelliklerinin rolü çok büyüktür.

Takviye malzemelerinin yönlenmelerine dik doğrultuda, matrisin mekanik özellikleri ve takviye malzemesi ile matris arasındaki bağ kuvvetleri, kompozit yapının mukavemetini belirleyici önemli hususlardır. Matris takviye malzemesine göre zayıf ve daha esnektir. Bu özellik kompozit yapıların tasarımında dikkat edilmesi gereken bir husustur (Kazanç, 2002).

Matris malzemesine göre, matris malzemelerini bir sınıflandırma yapmak gerekirse;

- Metal Matrisli,
- Seramik Matrisli ve
- Polimer Matrisli olarak yapabiliriz.

Bu çalışmada polimer matris malzemelerle çalışılmıştır.

2.1.2.1. Polimer matris malzemeler

Kompozit malzemelerde polimer esaslı matrislerin dışında metal, seramik türevi malzemelerde matris olarak kullanılmaktadır. Diğer matrislerin kullanılmasına rağmen Kompozit malzemelerin % 90'i polimer esaslı matrislerle üretilmektedir. Matris malzemelerinin genellikle plastik esaslı olmasından dolayı kompozit malzemeler de genellikle takviye edilmiş plastikler olarak adlandırılmaktadır. Metal matrisler büyük çaplı uygulamalarda kullanılmak için çok pahalı ve çalışılmaları çok zordur. Seramik matrisler ise yüksek oranda kırılgan olmalarından dolayı yeterli dayanıklılığa sahip olmamaları nedeniyle kullanım alanları yüksek ısı ile kullanılan yerlerle sınırlanmaktadır. Seramik matrisli kompozitlere örnek olarak karbon matrisli kompozit verilebilir; bu malzemeleri üretmek çok zor ve çok pahalıdır. En çok tercih edildikleri uygulamalar yarış arabalarının ve uçakların fren balatalarıdır. Tüm diğer matris alternatifleri arasında ticari olarak en uygun olan plastik matrisler arasında ise en çok kullanılan termoset esaslı olan polyester ve epoksi reçineleridir. Matrisler güçlü yapıştırma, çevre ve atmosfer şartlarına yüksek dayanım ve yüksek mekanik özellikler göstermektedir. Bir matrisin öncelikle sağladığı mekanik özellikler yüksek sertlik ve yüksek dayanıklılık değerleridir. İyi bir malzeme sert olmalıdır, fakat gevrek bir malzemenin gösterdiği davranışlardan dolayı performansı düşmemelidir. Bu özellikleri büyük ölçüde karşılayan polimer esaslı matrisler termoset ve termoplastik matrisler olarak iki tür olarak bulunmaktadır (ER, Hava Harp Okulu).

Termoset polimerler kürlenmeden sonra çözülmez ve kaynaşmazlar. Çünkü kuvvetli kovalent bağlarıyla sıkı sıkıya birleşmişlerdir. Termoplastikler ise yüksek sıcaklık ve basınçta şekil verilebilir, çünkü bağlar zayıf van der Waals türüdür. Termosete tipik örnek olarak epoksi, polyester, fenolik ve poliamid verilirken, termoplastiklere tipik örnek olarak polietilen, polipropilen, polistiren, polieter-eter-keton (PEEK) verilebilir. Termoset ve termoplastik arasındaki farklar Tablo 1.2' de verilmiştir (Peters, 1998).

Çizelge 2-2 Termoset ve termoplastik arasındaki genel farklılıklar (Peters, 1998)

Termoplastikler	**Termosetler**
Isıtma ve basınçta yumuşar ve böylece tamiri kolaydır	Isıtmada bozulur
Yüksek gerinmelerde kopar	Düşük gerinmelerde kopar
Belirsiz raf ömrü	Belirli raf ömrü
Tekrar proses edilebilir	Tekrar proses edilemez
Yapışkan değildir ve tutması kolaydır	Yapışkandır
Kısa kürleme zamanı	Uzun kürleme zamanı
Yüksek üretim sıcaklığı ve viskozitesi üretimini zorlaştırıyor	Düşük üretim sıcaklığı
Mükemmel çözücü direnci	Vasat çözücü direnci

Bu çalışmada termoset matris malzemesi olan epoksi reçine kullanılmıştır. Konunun devamında epoksi reçineler ile ilgili kaynak ve belgeler araştırılmış ve sunulmuştur.

2.1.2.1.1. *Epoksi reçineler*

Epoksiler iki ya da daha fazla epoksit içeren bileşenlerden oluşurlar. Polifenol'ün epikloridin ile bazik şartlarda reaksiyonu sonucu elde edilirler. Viskoz ve açık renkli bir sıvı halindedirler.

Epoksilere uygulanan kür işlemleri ile yüksek sıcaklıklara dayanımları 150-200ºC' a artırılabilir. Saydam ve yapışkan hal amorf polimerlerin karakteristiğidir. Tüm polimerler düşük sıcaklıklarda saydamlaşırlar ve yüksek sıcaklıklarda kauçuklaşırlar. Geçişin meydana geldiği sıcaklık aralığına "Camsı geçiş sıcaklığı"

adı verilir. Camsı geçiş sıcaklığı maksimum çalışabilme sıcaklığının bir ölçüsüdür. 100 ºC' a artırılabilir. 150-250 ºC arasında uygulanacak bir kür ile 150-250 ºC arasında maksimum çalışma sıcaklığı sağlanabilir. Kür işlemleri uygun katalizörlerin kullanılması ile hızlandırılabilir (Aran ve Afacan, 1988)

Epoksilerin avantaj ve dezavantajları aşağıdaki gibi özetlenebilir.

Avantajları:

1. Kopma mukavemetleri yüksektir.
2. Elyaf yapılarla yüksek bağ mukavemeti sağlarlar.
3. Yüksek aşınma direncine sahiptirler.
4. Uçucu değildirler ve kimyasal dirençleri yüksektir.
5. Düşük ve yüksek sıcaklıklarda sertleşebilme özelliğine sahiptirler.

Dezavantajları:

1. Polyesterle karşılaştırıldığında pahalıdır.
2. Polyestere oranla yüksek viskoziteye daha az uygundur.

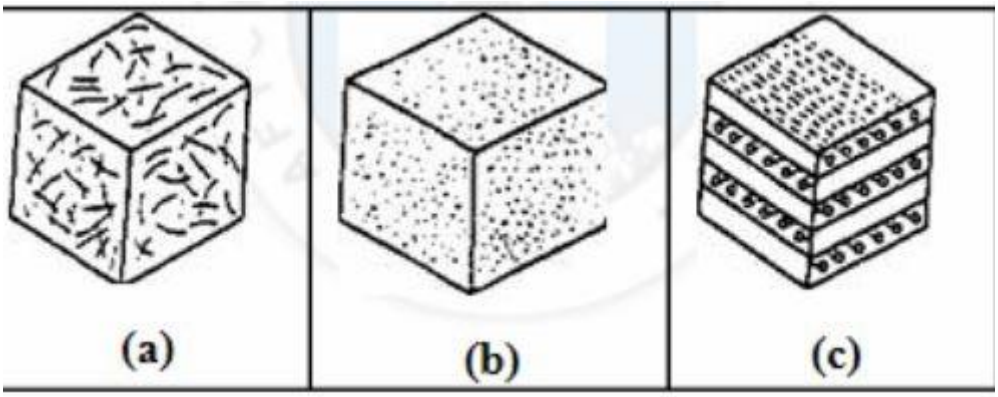
Epoksiler avantajlarının çokluğu ve tüm elyaf malzemelerle kullanılabilir yapılar olmaları nedeniyle, uçak yapısında tabakalı kompozit yapılar olarak yaygın bir kullanım alanına sahiptirler. Genellikle, karbon elyaflarla birlikte kullanılırlar.

Çizelge 2-3 Bazı matris malzemelerinin özellikleri (Aran ve Afacan, 1988)

Özellikler	Epoksi			Polyester	Fenolik
	Oda Sıc. Kürlenmiş	Yük. Sıc. Kürlenmiş	Gelişmiş		
Özgül ağırlık (gr/cm^3)	1.1 – 1.3	1.2 – 1.4	1.3	1.2	1.2 – 1.3
Elastik modül (GPa)	2 – 3	2.5 – 3.0	3.5	2 – 3	5 – 11
Çekme mukavemeti (MPa)	50 – 70	70 – 90	60	50 – 60	50 – 60
Kop. uzaması (%)	2 – 6	2 – 5	2	2 – 3	1.2
Maks. İşlem sıc. (ºC)	70 – 100	100 – 180	180	60 – 80	100 – 125

2.2. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Kompozit malzemeleri yapıları gereği değişik şekillerde sınıflandırma olanağı mümkündür.



Şekil 2-5 a) Fiber Takviyeli Kompozit b) Parçacık Takviyeli Kompozit c)Tabakalı Kompozit

Takviye malzemesine göre parçacık takviyeli kompozitler, fiber (lif) takviyeli kompozitler ve tabakalı kompozitler olarak sınıflandırılabildiği gibi matris malzemesine göre de sınıflandırma yapmak mümkündür. Matris malzemesine göre;

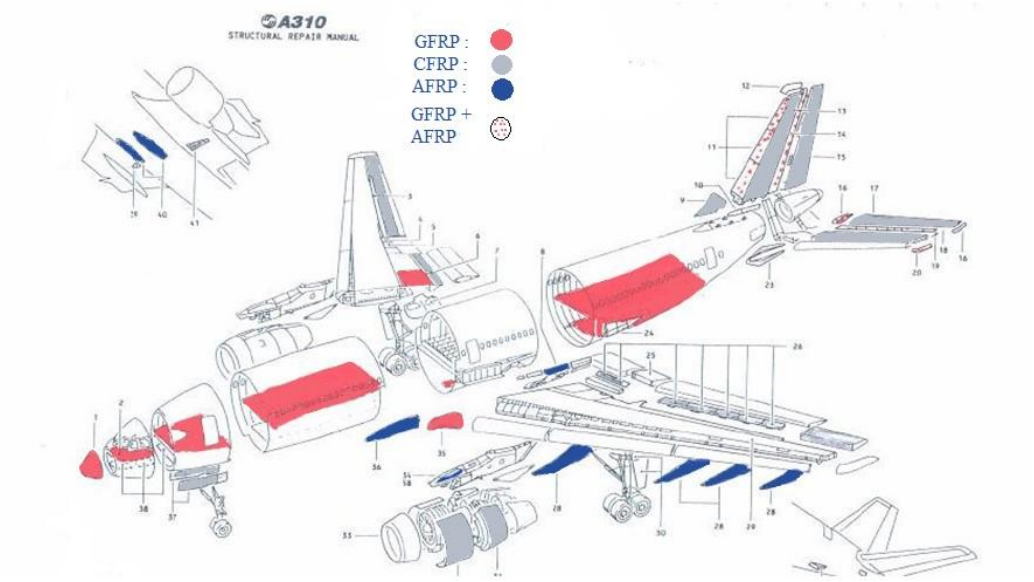
- Polimer Matrisli Kompozitler,
- Metal Matrisli Kompozitler,
- Seramik Matrisli Kompozitler olarak sınıflandırılmaktadır.

Bu çalışma da polimer matrisli kompozit çalışıldığı için bundan sonraki konu devamında polimer matrisli kompozit malzemeler ile ilgili bilgiler sunulmuştur.

2.2.1. Polimer matrisli kompozitler

Polimerler, metal ve seramiklere göre çok daha fazla karmaşıktırlar. Liflerle pekiştirilmiş polimer kompozitler endüstride çok geniş kullanma alanına sahiptir. Pekiştirici olarak cam, karbon aramid ve boron lifleri kullanılır.

Polimer kompozitlerde kullanılan en önemli bağlayıcı malzeme polyester ve epoksidir. Pekiştirici liflerin miktarı arttıkça kompozitin mukavemeti yükselir. Polimer kompozitlerin en önemli özellikleri yüksek özgül mukavemet(mukavemet/ özgül ağırlık) ve özgül elastisite modülüdür. Dolayısıyla bu özelliklerden dolayı diğer malzemelere üstün durumundadırlar. Bu üstünlüklerinden dolayı polimer kompozitler uçak ve uzay endüstrisinde alüminyum alaşımlarına tercih edilir.



Şekil 2-6 Uçak ve uzay endüstrisinde kullanılan polimerik kompozitler (Kaya, 1987)

Matris olarak kullanılan polimerler ucuz ve kolaylıkla çalışılabilir malzemelerdir. Diğer taraftan düşük modüle ve düşük kullanım sıcaklığına sahiptirler.

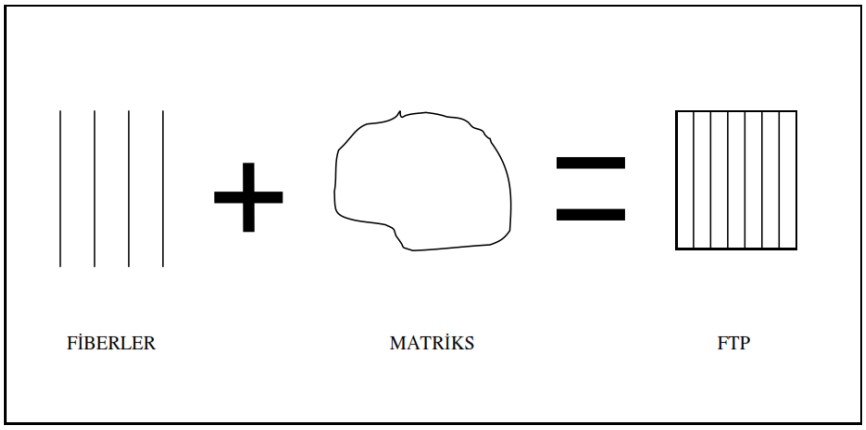
Polimer matrisli kompozitlerle çalışırken göz önüne alınması gereken en önemli faktörlerden biri sıcaklık, diğeri nemdir. Özellikle bu iki faktörün beraber etkin olduğu şartlarda polimer matrisli kompozitlerin mekanik özelliklerinde, hidrotermal etkilerden dolayı düşüşler meydana geldiği belirtilmektedir. Polimer matrisli kompozitlerin üretilmesinde en çok bilinen ve en fazla kullanılan yöntemlerden bazıları; elle sıvama, tel sarma, kese kalıplama işlemi, pultrüzyon metodu, sıvı akış tekniği, takviyeli reaksiyon enjeksiyon kalıplama, ekstrüzyon ve termo oluşum yöntemleridir. Polimerlerde kullanılan takviye malzemelerinden en önemli olanlarının; cam fiber, aramid fiber, boron fiber ve karbon fiberlerdir (Smallman, 1999).

2.2.2. Fiber takviyeli polimer kompozitler

FTP (Fiber Takviyeli Polimer), yeni özellikler vermek için iki ya da daha fazla malzemenin birleştirilmesi ile oluşan bir kompozittir. Fakat FTP diğer kompozitlerden ayrılmaktadır. Çünkü kendini oluşturan malzemeler moleküler düzeyde farklıdır ve mekanik olarak ayrılabilir. FTP' nin mekanik ve fiziksel özellikleri onu oluşturan bileşenlerin özellikleri ve mikro düzeyde yapılandırmalar tarafından kontrol edilir (Tuakta, 2005).

Polimer matrisli ve fiber takviyeli kompozitlerin sürtünme ve aşınma özellikleri büyük ölçüde kompoziti oluşturan bileşenlerin özelliklerin ve aralarında oluşan ara yüzey özelliklerine bağlıdır. Bunlar matrisin türü, takviye malzemesi türü, takviye elemanının yapı içerisindeki dağılımı, fiber hacim oranı, fiber şekli, fiber kalınlığı, fiberin matris içerisindeki yönlenmesi, karşı yüzey malzemenin özellikleri ve takviye malzemesinin matrise göre sertliği gibi özelliklerdir (Zum Gahr, 1987).

FTP ara yüzeyde bağlanmış fiber ve matristen oluşmaktadır. Şekil 1.'de fiber takviyeli polimer oluşumu gösterilmiştir (Tuakta, 2005).

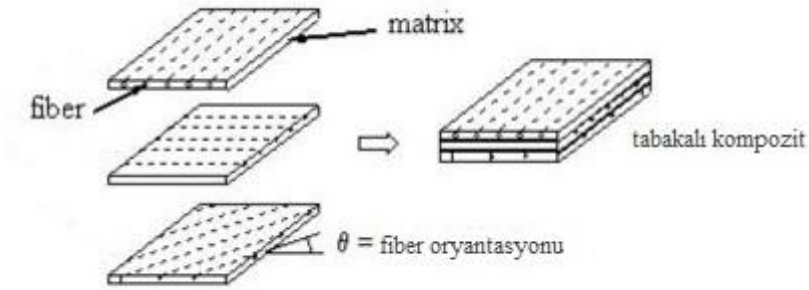


Şekil 2-7 Fiber takviyeli polimer kompozit oluşumu

Bu çalışma da karbon fiber takviyeli polimer kompozit (CFRP) çalışılmıştır.

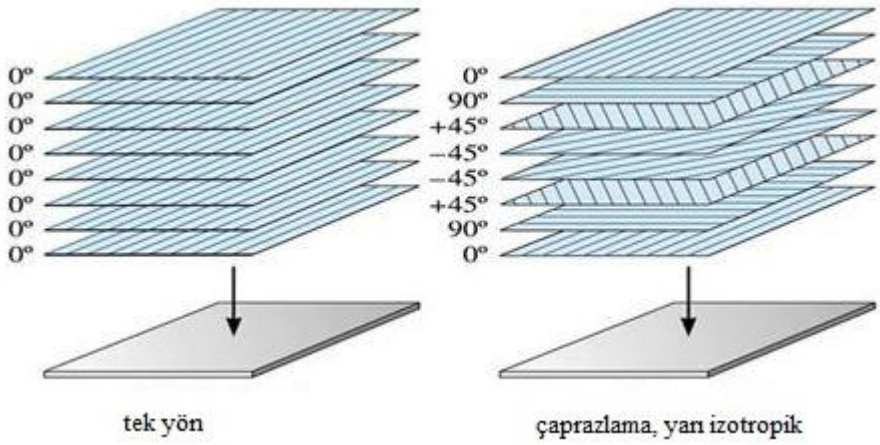
2.2.3. Tabakalı kompozitler

Tabakalı kompozit yapı, en eski ve en yaygın kullanım alanına sahip olan tiptir.



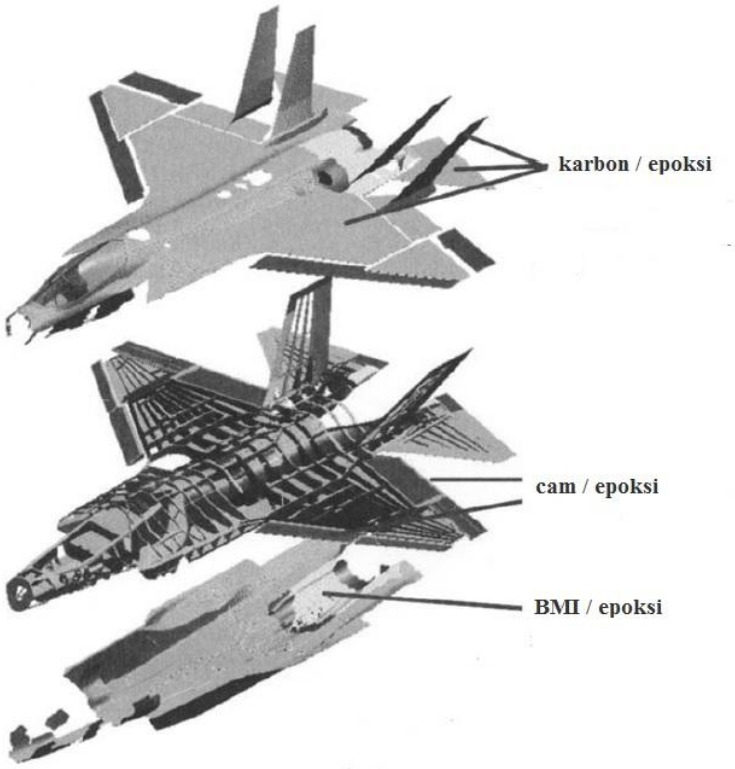
Şekil 2-8 Tabakalı kompozit yapısı

Farklı elyaf yönlenmelerine sahip tabakaların bileşimi ile çok yüksek mukavemet değerleri elde edilir.



Şekil 2-9 Tabakalı kompozitlerde fiber oryantasyonu

Isıya ve neme dayanıklı yapılardır. Metallere göre hafif ve aynı zamanda mukavemetli olmaları nedeniyle tercih edilen malzemelerdir. Sürekli elyaf takviyeli tabakalı kompozitler uçak yapılarında, kanat ve kuyruk grubunda yüzey kaplama malzemesi olarak çok yaygın bir kullanıma sahiptirler. (Kinet, 2008) .



Şekil 2-10 AV-8B uçağında kullanılan tabakalı kompozitler (Baker et al., 2004)

2.3. Nano Yapılar

Nano boyutlu malzemeler üzerine gerçekleştirilen çalışmalar son yıllarda tek başına önemli bir alan olma doğrultusunda büyük bir gelişme göstermektedir. Nano boyutlu malzeme olarak tanımlanan yapılar; nanokristaller, nanopartiküller, nanotüpler, nanoteller, nanoçubuklar veya nano ince filmler gibi farklı sınıflara ayrılmaktadır. Bu konu üzerine ilginin yoğunlaşmasının temel sebebi maddelerin belli boyut aralığında hacimsel yapılarından farklı olarak olağandışı özellikler ve işlevsellik sergilemeleridir (Goldstain, 1997; Rao et al., 2005). Boyutları 100 nm ve altında kalan tozlar olarak tanımlan nanopartiküller ise nano boyutlu malzemelerin dolayısıyla nanoteknolojinin temelini oluşturmaktadır (Miller et al., 2004; Rao et al., 2005). Bu partiküller diğer ticari malzemelerden genelde farklı ve üstün kabul edilen özellikler göstermektedir. Sıkça belirtilen nanopartikül özelliklerinin çekiciliğinin günümüzde bilinen nedenleri ise; kuantum boyut etkileri, elektronik yapısının boyut bağımlılığı, yüzey atomlarının benzersiz karakterleri ve yüksek yüzey/hacim oranı olarak ön plana çıkmaktadır (TÜSİAD, 2008). Nanopartikül sentezi bu yapıların sergiledikleri olağandışı özellikler sebebiyle yüksek aktiviteli katalizörler, optik uygulamalar için özel teknolojik malzemeler ile birlikte süperiletkenler, aşınmaya karşı katkılar, yüzey aktif maddeler, ilaç taşıyıcılar ve özel teşhis aletleri gibi birçok teknolojik ve farmakolojik ürünlerin hazırlanmasının yolunu açmıştır. Bunların yanı sıra, malzemelerin nanoboyut seviyesinde kontrolü nanotaşıyıcılar, sensörler, nanomakinalar ve yüksek yoğunluklu veri depolama hücreleri gibi kendine özgü işlevselliğe sahip minyatürleştirilmiş aygıtların gerçekleştirilmesine izin vermektedir (Goldstain, 1997; Liveri, 2006). Açıkça görülmektedir ki, nano yapılı malzemelerin ve cihazların tasarlanmasını, üretimini ve işlevsel olarak kullanımını kapsayan nanoteknoloji alanındaki yeni gelişmeler için vazgeçilemez ilk adım nanopartiküllerin üretimidir. Nanoteknolojik malzemelerin çıkış noktasını oluşturan nanopartiküller geniş bir kimyasal aralık ve morfolojide üretilebilirler. Günümüzde çekirdek-kabuk, katkılı, sandviç, boşluklu, küresel, çubuk benzeri ve çok yüzlü gibi farklı morfolojilere sahip metal, metal alaşımı, seramik ve polimer esaslı veya bunların karışımından istenilen özelliklere sahip nanopartiküller hazırlanabilir (Liveri, 2006).

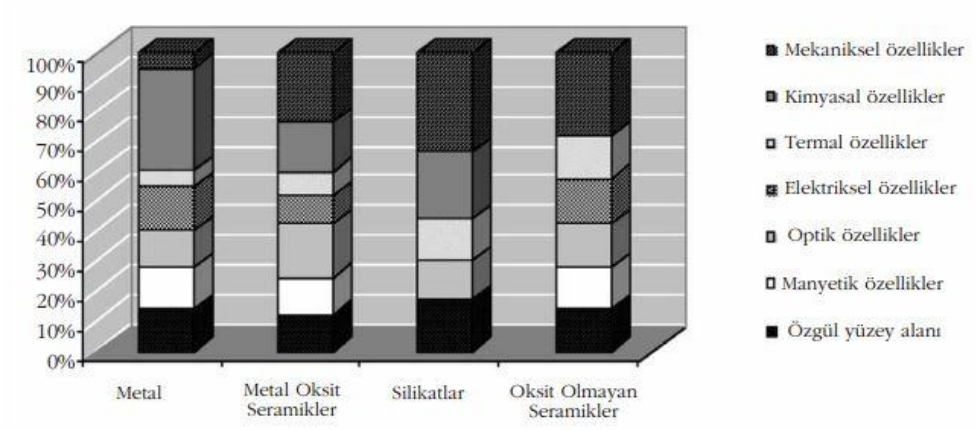
2.3.1. Nano yapıların özellikleri

Nanoteknolojinin önemli bir yönü, nanometre ölçeğinde, malzeme özelliklerinde ve fiziksel olgularda önemli değişikliklerin meydana gelmesidir.

Kütlesel malzemedeki daha büyük parçacıklarla karşılaştırıldığında, nanoparçacıklar tamamen yeni ya da gelişmiş, belirli özelliklere (boyut, dağılım, morfoloji, faz vs.) dayalı olan niteliklere sahiptirler.

Delphi Paneli'ne katılmış olan uzmanlara göre, nanoparçacıkların en fazla gelecek vadeden yararlanılabilir özellikleri aşağıdaki gibidir:

Çizelge 2-4 Nanoparçacıkların En Fazla Yararlanılabilen Özellikleri (Willems and van der Willenberg 2005)



Özgül Yüzey Alanı (m^2/g)

Nanoparçacıkların boyutları azaldıkça, yüzeylerinin hacimlerine olan oranı da artar. Özgül yüzey alanı, yüzey alanın stabilizasyonu, nanopartiküllerin topolojisi (pürüzsüzlük) ve destek malzemeyle ara yüzey gibi özelliklerle ilgili olduğu gibi, asıl olarak katalitik reaktivite ve diğer benzer özelliklerle (örn. sensorlar) de ilgilidir. Polimer dolgusu olarak kullanımda, büyük yüzey alanı, güçlü polimer/dolgu etkileşimine neden olur ve daha düşük yüklemelerde daha verimli güçlendirmeye olanak sağlar. Bu da, gelişmiş malzeme performansı sağlar ve daha az malzeme kullanımına olanak tanıyarak maliyetin düşmesine yardımcı olur (Willems and van der Willenberg 2005).

Mekanik Özellikler

Kompozitlerde, nanoparçacığın kimyasına, en boy oranına, dağılma ve polimer matrisiyle fazlar arası etkileşimlere (yüzey kaplamayla ve polimer formülasyonuna eklenen uyumlulaştırıcı maddelerle düzenlenen) bağlı olarak, nihai kompozitlerin mekanik özelliklerinde farklı güçlendirme oranları elde etmek mümkündür. Bazı uzmanların görüşlerine göre, belirli nanoparçacık-bazı kompozitler kısa süreli bir "altın çağ" yaşayacaklar ve ardından da yerlerini nanotüp kompozitlere bırakacaklardır. Şu konuda şüphe yoktur ki, mekanik özellikler söz konusu olduğunda, hâlihazırda birçok araştırma grubu tarafından da gösterilmiş olduğu gibi, nanotüpler bu alana çok önemli bir katkı sağlamak üzere hazırlanmaktadırlar (Willems and van der Willenberg 2005).

Elektriksel Özellikler

Nanoparçacıkların tek tek özellikleri sayesinde taşımayı kontrol etmek mümkündür. Örneğin, kimyasal yapı ve boyut, iyonik potansiyeli (IP) ya da elektron afinitesini (EA) kontrol ederler. Kendiliğinden düzenlendiklerinde, iç parçacıklar yoluyla, ligandın doğası ve uzunluk birleştirilerek ya da mekanik basınç uygulanarak daha da fazla kontrol sağlanabilir. Bu da, elektronik ve donanım mantığı uygulamaları için elverişlidir. Metal nanoparçacıkları –metal olmayanların tersine-, daha ince bir tabakaya ve daha güvenilir bir elektriksel rotaya sahip olduklarından, tipik olarak daha fazla noktadan noktaya temasa da sahiptirler. Bu özellikten, iletken gümüş mürekkebinde ve diğer elektronik uygulamalarda yararlanılmaktadır. Metal oksit seramik nanoparçacıklar, elektromanyetik dalgalara karşı özel tepki gösteren, özel aygıtlar elde etmek amacıyla kullanılabilir. Yüzeyin işlenmesiyle beraber, bu parçacıkların sahip olduğu oldukça yüksek yüzey alanı, yalıtım sistemlerinde alan ayrıştırma özellikleri ve kırılma gücü gibi performans özelliklerini çarpıcı bir biçimde geliştirebilir. Bu nanoparçacıklar sayesinde, elektronik gereçler için yeni ambalaj malzemeler üretilebilir (Willems and van der Willenberg 2005).

Manyetik Özellikler

Parçacık boyutunun nano-boyuta düşmesi, sıklıkla manyetik davranışta (kütlesel malzemedekilere göre) gelişmeye neden olur. Örneğin, nano-boyuttaki yapı taşlarından oluşan mükemmel yumuşak kıvamlı manyetik malzemeler (transformatörler, çeşitli sensorlar vs. gibi uygulamalarda) bulunduğu gibi, sert manyetik malzemeler (değişken sıçrama mıknatısları) de bulunmaktadır (TÜSİAD, 2008).

Optik Özellikler

Soğurma ya da emilim dalga-boyu, boyut seçimiyle, ligandlar ve harici pertürbasyonla kontrol edilebilir. Örneğin, nanoparçacık boyutu ışığın kritik dalga-boyundan daha küçükse, saydamlık elde edilebilir. Bu da nanomalzemeleri (örneğin metaller, silikatlar ya da metal oksit seramikler), saydamlık ve diğer özellikleri (UV, IR-soğurma, iletkenlik, mekaniksel güç vs.) birleştirerek, bariyer filmler ve kaplama uygulamaları için oldukça uygun hale getirmektedir. Ayrıca, ilginç optik (ışık soğurma/filtre etme) özellikler kozmetik uygulamalarda da kullanılabilir (TÜSİAD, 2008).

Termal Özellikler

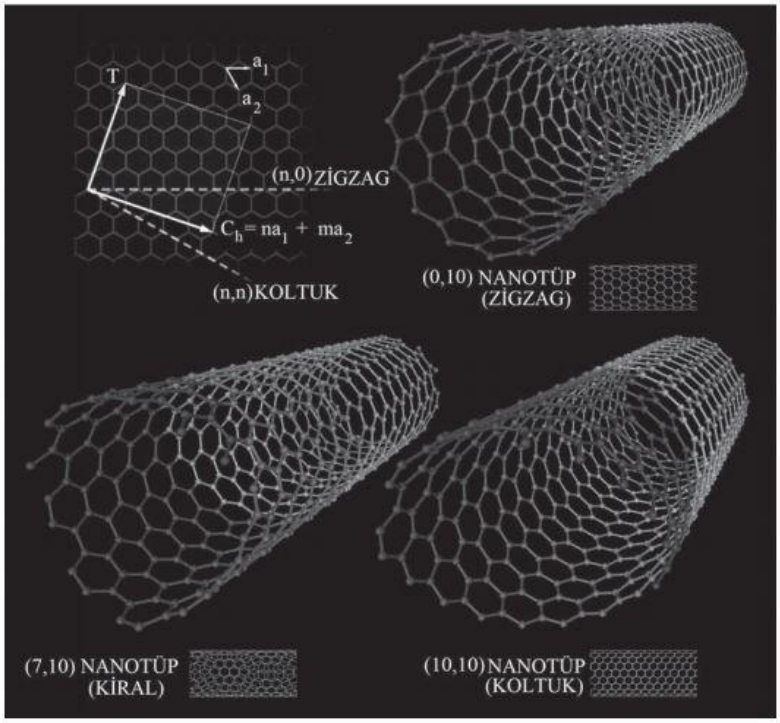
Homojen olarak yayıldıklarında, polimer sistemlere yönelik metal nanoparçacıkların termal özelliklerinde belirgin bir geliştirme sağlanarak, işleme süresi kısaltılabilir. Sinterleme ve erime sıcaklığı, azalan nanoparçacık boyutuyla küçülür. Bazı uygulamalar için yüksek termal iletkenlik gereklidir. Küçük parçacıklar temel matrise daha verimli eklenebilir (matris kuvveti azaltılmadan) ve daha iyi termal iletkenlik sağlayabilirler (Willems and van der Willenberg 2005).

Kimyasal Özellikler

Reaktivite kataliz ve ilgili uygulamalar (sensorlar vs.) için en önemli özellik olarak kabul edilebilir. Reaktivite ve katalitik aktivitenin birleştirilmesiyle, yakıtlar (ve yakıt katkı maddeleri), yakıt pilleri ve patlayıcılar gibi bazı mühim uygulama alanları için kritiktir. Kataliz, büyük yüzey alanı/hacim oranı ve olası homojen nanoparçacık dağılımıyla gelişmektedir. Bu da, genellikle kullanılmakta olan platin grubu, değerli metallerin (yakıt pilleri ve katalitik dönüştürücülerde fazlasıyla kullanılmaktadırlar) ihtiyaç duyulan miktarlarının azaltılmasında yardımcı olur ve yalnızca nanoparçacık halindeyken etkili katalizör olabilen altının ve bunun gibi daha az kullanılan diğer metallerin de kullanımının önünü açar (Willems and van der Willenberg 2005).

2.3.2. Karbon nanotüpler

Karbon nano tüp (CNT - Carbon Nanotube), nanoteknoloji için bir diğer yapıtaşıdır. CNT 2 boyutunda nano-ölçeğindedir. Nanometre çaplarında saf karbon molekülü birkaç telden ve bir kümes teli levhasını andıran, birbirilerine bağlı birçok mikron uzunluktan oluşmaktadır (Şekil 1.4). Tek-duvarlı karbon nano tüp (SWCNT - Single Wall Carbon Nanotube), nanometre boyutunda içi boş bir silindir oluşturacak şekilde yuvarlanmış, tek atom katmanlı kalın bir grafit levhasından (buna grafen de denilir) oluşur. Çok-duvarlı karbon nano tüpler (MWCNT - Multi Wall Carbon Nanotube), iç içe geçmiş birkaç eşmerkezli karbon tüpten oluşmaktadır (Sharifzadeh, 2006).



Şekil 2-11 Üç Tip Tek-Duvarlı Karbon Nano Tüpün Üç Boyutlu Modeli (Sharifzadeh, M. 2006)

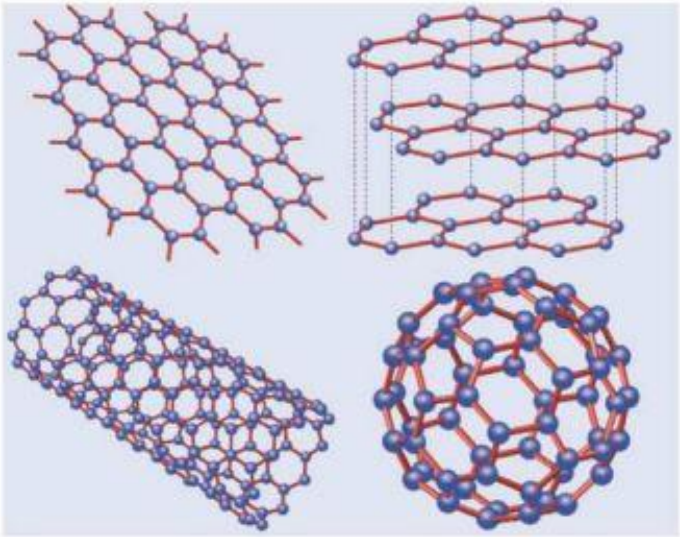
Farklı özellikleri nedeniyle nano tüpler, nanoteknolojinin en heyecan uyandıran ve en fazla gelecek vaat eden keşfi olarak görülürler. Şekillerine ve boyutlarına bağlı olarak, karbon nano tüplerin elektronik özellikleri metalik ya da yarıiletken olabilir. Metalik özellikler CNTleri bakırdan daha iletken yapabilir ya da elmastan daha iyi ısı iletmelerini sağlayabilir. Yarı-iletkenlik özellikleri onları daha güçlü, küçük ve hızlı bilgisayar çipleri üretimi için uygun adaylar yapmaktadır. C-C kovalent bağlanmaları ve kesintisiz hegzagonal ağ yapıları nedeniyle, CNT'ler bilinen en güçlü ve en esnek malzemelerdendir. Şu anda bu yeni özellik, atomik mikroskopide, örneğin AKM (Atomik Kuvvet Mikroskobu) ucu üretmek için kullanılmaktadır. CNT'lere dayalı uçlar çok güçlüdür, geleneksel silikon ve tungsten uçlar gibi kolayca aşınmazlar ve şaşırtıcı oranlarda çözünürlük sağlarlar (NASA, 2006).

Mevcut olan ve tasarlanan bazı diğer CNT uygulamaları, veri depolama aygıtları, kondansatörler, yassı panel ekranlar, ısı eşanjörleri, çok güçlü kompozitler, filtre membranları, uzay giysileri, biyosensörler, yakıt pilleri, çipler üzerinde laboratuvarlar ve çok daha fazlasını içermektedir (Sharifzadeh, M. 2006).

2.3.3. Grafen

Sadece karbon atomlarından oluşan sistemler arasında karbon atomunun iki boyutlu allotropu olan grafen, diğer allotropların elektronik özelliklerinin anlaşılabilmesi açısından son derece önemli bir yere sahiptir. Grafen karbon atomlarının altıgenlerden oluşan bal peteği örgü yapısında sıralanmasından elde edilen iki boyutlu düzlemsel yapıların çok nadir örneklerinden birisidir. Karbon atomları 2s ve 2p orbitallerinin birleşimi ile 120 derece açılı sp2 melezleşmesi yaparken boşta kalan pz orbitalleri ise grafenin elektronik özelliklerini belirleyerek ona sıra dışı özellikler kazandırır. Grafen tabakasında iki karbon atomu arasındaki uzaklık 1.42 Angstromdur. Saydam olan bu grafen tabakasının özelliği ise elektriği ve ısıyı çok hızlı bir şekilde iletebilmesidir. Grafen yapısı çelikten 6 kat hafif olup, yoğunluğu ise 6 kat daha düşüktür. Buna karşılık çelikten 6 kat daha sert ama 13 kat daha fazla esneme yeteneğine sahiptir.

Fullerenler karbon atomlarının dairesel olarak sıralanmasıyla elde edilen ve bu yüzden fiziksel bakış açısından bakıldığında sıfır boyutlu ve ayrık enerji seviyelerine sahip moleküllerdir. Daha farklı bir şekilde ifade edilecek olunursa fullerenler grafen tabakasının top şeklinde kıvrılmasıyla oluşur ve arada altıgenler haricinde beşgenlerin de olduğu yapılardır. Bu durum Şekil 2.1'de gösterilmektedir. (Neto vd. 2006)

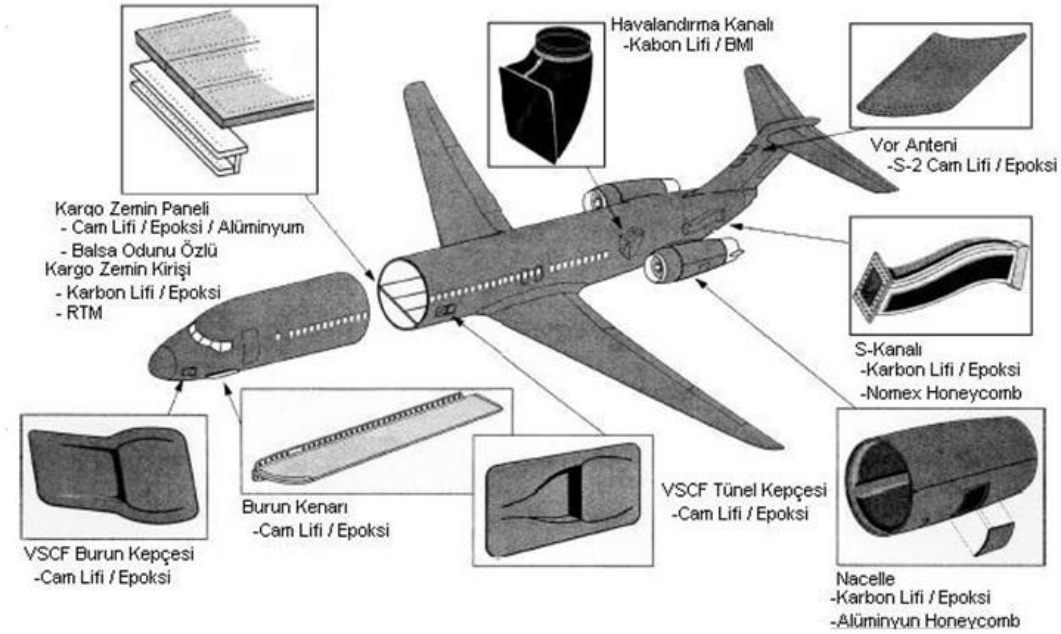


Şekil 2-12 Karbon atomu allotropları (Neto vd. 2006) Sol üst: grafen; sağ üst: grafit; sol alt: nanotüp; sağ alt: fullerene.

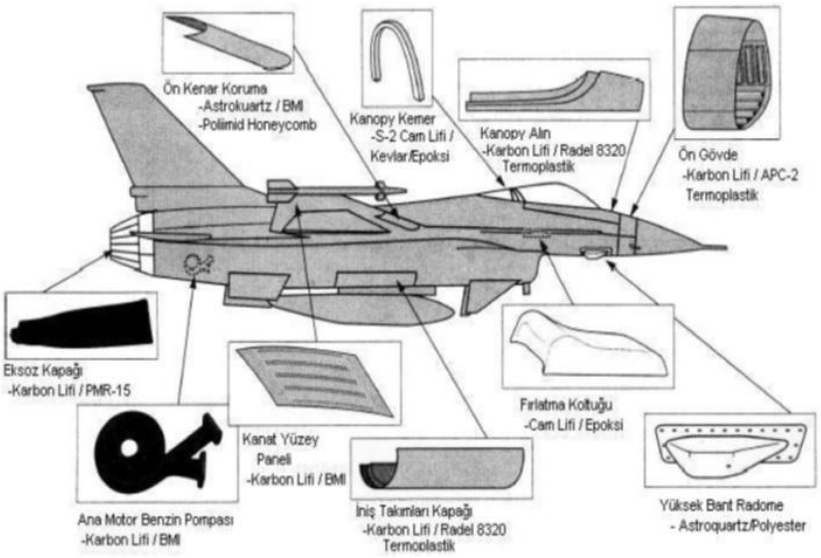
Bir diğer allotrop olan karbon nanotüp ise grafenin verilen bir doğrultuda silindirik bir şekilde kıvrılmasıyla ve iki uçtaki karbon atomlarının birbirleri ile bağ yapmasıyla elde edilen bir boyutlu yapılardır ve ancak yapay yollarla sentezlenebilirler. Son olarak karbonun üç boyutlu allotropu olan grafit ise grafen tabakalarının üst üste gelerek aralarında zayıf Van der Waals etkileşimi ile bağlanması sonucu elde edilir. Bu etkileşim oldukça zayıftır. Kurşun kalemi kâğıda sürtünce bu zayıf bağlar kırılır ve kâğıda yayılan grafen ve grafit tabakalar yazı izlerini oluşturur. Şekil 2.10 ’da de görüldüğü üzere grafit çok tabakalı bir yapıya sahiptir. Her bir tabakada karbon atomları 0.142 nm aralıklarla birbirine altıgen örgü yapısıyla bağlı olup tabakalar arası uzaklığı ise 0.335 nm’dir. Normal şartlarda karbon atomunun en kararlı olduğu durum grafit durumudur. Aslında grafen yapı diğer bütün allotropların yapı taşı olmasına rağmen, grafitin; yani kurşun kalemin icadından (Petroski 1564) tamı tamına 440 yıl sonra (Novoselov 2004) fark edilmiştir. Bunun sebeplerinden biri hiç kimsenin grafen yapısının bu kadar serbest bir şekilde oluşacağını beklememesi iken diğeri ise makroskopik alanlarda gözlemlenen kurşun kalem çiziklerinin bir atom kalınlığındaki tabakalarını inceleyebilecek deneysel düzeneğin olmamasıdır. Grafen en sonunda SiO2 örneği üzerinde bıraktığı beklenmedik optik etki sayesinde optik mikroskop aracılığı ile gözlemlenmiştir. Bu açıdan bakıldığında grafen üretmesi çok kolay ama fark etmesi de bir o kadar zor olan bir yapıdır.

3. UÇAK YAPILARINDA KULLANILAN KOMPOZİT MALZEMELER

Uçak endüstrisinde günümüzde en önemli konu malzemenin doğru olarak seçilip bir bütün yapı içerisinde değerlendirilmesidir. Uçak malzemelerini öncelikle, metal esaslı ve kompozit malzemeler olarak iki grupta incelemek mümkündür. Paslanmaz çelikler, nikel alaşımları, titanyum alaşımları ve alüminyum alaşımları yaygın olarak kullanılan metal esaslı uçak malzemeleridir. Son 30 yılda reçine ve fiber teknolojisinde büyük gelişmeler sağlanarak geliştirilen kompozit malzemelerde, konvansiyonel malzemelerin elastisite modüllerine ulaşılmıştır. Bu nedenle kompozit malzemeler; kaplamalar, takviye parçalarının kontrol yüzeyleri ve flaplarda kullanım alanı bulmuştur.



Şekil 3-1 Ticari uçaklarda kullanılan kompozitler - Boeing 727 (Kaya, 1987)



Şekil 3-2 Askeri uçaklarda kullanılan kompozitler - AV-8B (Kaya, 1987)

Kompozit malzemelerin imalata uygunluğu, bakım maliyetini düşük ve mekanik özelliklerinin iyi olması uçak tasarımında büyük avantaj sağlar.

Çizelge 3-1 Yapısal Uçak Malzemelerinin Mekanik Özellikleri (Arıcan, 2003)

	MALZEME	Yoğunluk ρ (gr/cm³)	Elastik Modül E (GPa)	Özgül E. Modül E / ρ	Çekme Muk. $\sigma_ç$ (GPa)	Özgül Çek. Muk. $\sigma_ç$ / ρ	Maks. Şek. Değ. (%)
KONVANSİYONEL	ÇELİK (3140)	7,90	200,0	25	1,85	0,24	11,00
	ALÜMİNYUM ASG (6061) T6	2,70	70,0	26	0,35	0,13	11,00
	ALÜMİNYUM AU4G1 (2024) T4	2,80	73,0	26	0,29	0,21	11,00
	ALÜMİNYUM A25G4 (7075) T6	2,80	76,0	27	0,45	0,16	11,00
	TİTANYUM T6V	4,40	119,0	27	1,14	0,26	14,00
KOMPOZİT	BOR/EPOKSİ	2,10	270,0 *	129 *	2,00 *	0,95 *	6,50*
	BOR/ALÜMİNYUM	2,70	225,0 **	83 *	1,25 *	0,46*	10,00*
	GRAFİT/EPOKSİ	1,70	208,0 * 10,3 **	122 *	1,34 * 0,03 **	0,79*	0,78* 0,29**
	KARBON/EPOKSİ	1,50	142,0 * 10,3 **	95 *	1,60 * 0,07 **	1,06*	1,10* 0,57**
	KEVLAR/EPOKSİ	1,35	80,0 * 5,5 *	59 *	1,38 * 0,03 **	1,02*	1,70* 0,57**
	CAM/EPOKSİ	2,20	53,0 * 12,4 **	24 *	1,45 * 0,04 **	0,66*	2,70* 0,30**
	KARBON/POLYESTER	1,68	127,5 * 7,6 **	76 *	1,52 * 0,04 **	0,9*	1,20* 0,53**
	KEVLAR/POLYESTER	1,40	76,0 * 5,5 **	54 *	1,20 * 0,02 **	0,86*	1,60* 0,40**
	CAM/POLYESTER	1,80	39,0 * 9,6 **	22 *	1,13 * 0,02 **	0,63*	2,80* 0,21**

* : Elyaflar yönünde
**: Elyaflara dik yönde

Kompozit malzemelerin en önemli üstünlükleri, ağırlıklarının çok azaltılabilmesine imkan tanımasıdır. Kompozit yapı iç bileşenleri birbirlerine genelde kovalent bağla bağlı oldukları için çok yüksek dayanımlara erişebilmektedirler. Kompozit malzemelerin klasik malzemelere oranla diğer bir üstünlükleri de yorulma özelliklerinin çok iyi oluşudur. Tablo 3.1' den de görüleceği üzere klasik malzemelere göre kompozit yapı malzemelerinin gerilme/yoğunluk-tekrar arası ilişkide daha uzun ömürle daha yüksek oranlara dayanabilmektedirler. Kompozit malzemelerde, yüksel ısıl gerilmelere dayanıklı malzeme tasarımı da kolay ve mümkündür. Özellikle tabakalı kompozit malzemelerde bu tasarım yapılmaktadır (Arıcan,2003). Sonuç olarak kompozit malzemelerin uçaklar için sağladığı katkılar şu şekilde sıralanabilir;

- Ağırlık
- Mukavemet ve tokluk
- Yorulma
- Maliyet
- Tasarım kolaylığı

Çizelge 3-2 İleri Kompozitlerle Uçak Elemanı Bazında Sağlanan Ağırlık Kazançları (Arıcan,2003)

Uçak Tipi	Eleman	Konvansiyonel Malzeme	Kompozit Malzeme	Ağırlık Kazancı	Yapımcı Firma
DC-10	-İstikamet dümeni - Düşey kuyruk grubu	Al Alaşımı Al Alaşımı	Grafit/epoksi Grafit/epoksi	%26,8 %20,2	Mc Donnell-Douglas
L-1011	-Kanatçık -Dikey kuyruk	Al Alaşımı Al Alaşımı	Grafit/epoksi Grafit/epoksi	%26,3 %27,9	Lockheed Company
Boeing 727	-İrtifa dümeni	Al Alaşımı	Grafit/epoksi	%25,6	Boeing
Boeing 737	-Yatay kuyruk grubu	Al Alaşımı	Grafit/epoksi	%27,1	Boeing
F-111	-İrtifa dümeni -Kanat hücum kenarı	Al Alaşımı Al Alaşımı	Bor/epoksi Bor/epoksi	%27,0 %11,0	General Dynamics
F-15	-İrtifa dümeni -İstikamet dümeni	Titanyum Alaşımı Al Alaşımı	Bor/epoksi Bor/epoksi	%25,0 %35,0	Mc Donnell-Douglas
F-14	-İrtifa dümeni	Titantum Alaşımı	Bor/epoksi	%42,0	Grumman
F-4	-İstikamet dümeni	Al Alaşımı	Bor/epoksi	%44,0	Mc Donnell-Douglas
F-5	İniş takım kapakları	Al Alaşımı	Grafit/epoksi	%36,0	Northrop

Çizelge 3-3 A310 A320 uçaklarında kompozit uygulaması (Arıcan, 2003)

Bölüm	Malzeme
Yolcu kabini iç döşeme	Karbon fiber takviyeli polimer
Kanat gövde kaplaması	Karbon fiber takviyeli polimer
Radar konisi	Karbon fiber takviyeli polimer
Spoiler	Karbon fiber takviyeli polimer
Flap	Karbon fiber takviyeli polimer
Aileron	Karbon fiber takviyeli polimer
Düşey stabilize hücum ve firar	Karbon fiber takviyeli polimer
Kenarları (sabit kesimlerin)	Karbon fiber takviyeli polimer
Düşey dümen	Karbon fiber takviyeli polimer
Yatay stabilize firar kenarı	Karbon fiber takviyeli polimer
Paylon	Karbon fiber takviyeli polimer
Ana iniş takım kapakları	Karbon fiber takviyeli polimer
Motor kılıfı	Aramidfiber takviyeli polimer

Çizelge 3-4 Askeri uçaklarda kompozit yapılar (Arıcan, 2003)

Eleman	Malzeme	Yapımcı	Ağırlık Kazancı %
Kanat			
T-39 Merkez Kutusu	Bor-epoksi	NAR/IA	42
F-300 yüzey	Bor-epoksi	NAR/IA	21
Gelişmiş kompozit kanat yarısı	Bor-epoksi	Grumman	26
Optimize edilmiş kompozit kutu kiriş	Bor-grafit Bor - Al	Grumman	30
Başlangıç tasarımı	Grafit-epoksi	Mep/DAC	36
F-15	Bor-epoksi	KeD/DAC	22
C-130 merkez kutusu	Bor-epoksi	Lockheed/DA	13
FB-111 uç kutusu	Bor-epoksi	Grumman	35
LTV kutusu	Grafit-epoksi	LTV	22
AQM-34Q	PRD-46 Kevlar	Teledyne/Ryan	24
Kanat Elemanları			
C-5A slat	Bor-epoksi	Lockheed/DA	21
A-1 flap	Bor-epoksi	Bouglaa	21
F-5 hücum kenarı	Grafit-epoksi	Northrop	32
F-5 iniş takımı kapağı	Grafit-epoksi	Northrop	36
F-111 mafsalları	Bor-epoksi	GD-FW	-
Gövde			
F-111 arkası	Grafit-epoksi Bor - Al	GD-FW	19
F-5	Grafit-epoksi	GD-FW	26
YF/17	Grafit-epoksi	Northrop	41
Gövde Elemanları			
F-5 frenler	Grafit-epoksi	Northrop	23
A-7 frenler	Grafit-epoksi	LTV	40
C-141 iniş takımı kapağı	Bor-epoksi	Lockheed/DA	-
B-1 lonjeron	Bor-epoksi	NAR	32
Kuyruk Yüzeyleri			
F-111 yatay kuyruk	Bor-epoksi	GD/FW	21.5

F-5 yatay kuyruk	Grafit-epoksi	Northrop	23
A-4 yatay kuyruk	Grafit-epoksi	Bouglaa	33
F-14 yatay kuyruk	Bor-epoksi	Grumman	9
F-15 yatay kuyruk	Bor-epoksi	Mc Donnell	22
F-15 düşey kuyruk	Bor-epoksi	Mc Donnell	25
F-4 yön dümeni	Bor-epoksi	Mc Donnell	35

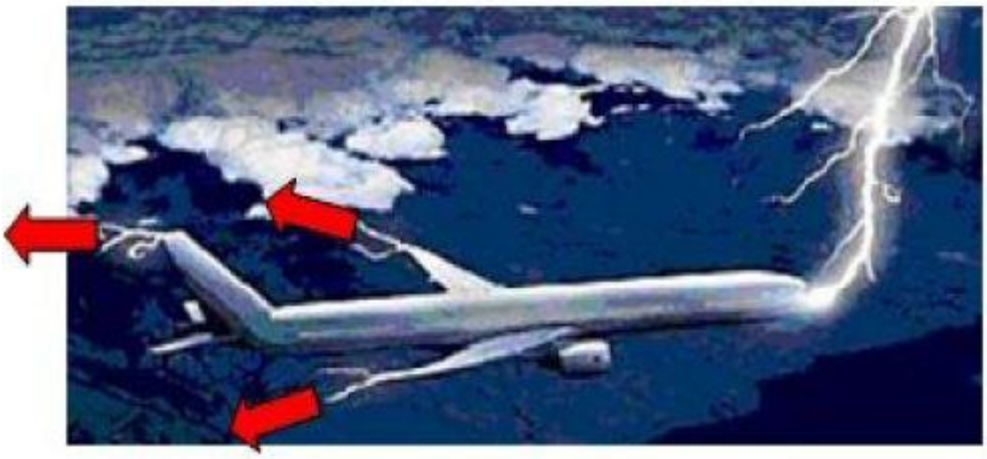
3.1. Kompozit Uçak Yüzeyinde Elektrik İletkenliği

Uçak yapıları tasarımında statik elektriğin veya uçuş esnasında yıldırım düşmesiyle oluşan elektriğin uçağa zarar vermeden akışını sağlamak oldukça önemli bir konudur. Ticari uçakların yılda bir ya da iki defa yıldırım çarpmasına maruz kaldığı tahmin edilmektedir (Özel ve Töre, 2007).

Uçak üzerinde elektrik farklı şekillerde oluşabilir. Bunu genelleştirirsek;

- Uçuş esnasında yıldırım düşmesi sonucu oluşan elektrik,
- Uçak kar, buz, sulu kar, dolu veya toz bulutu içinden geçerken sürtünme etkisi ile oluşan statik elektrik
- Elektronik cihazların oluşturduğu statik elektrik

Uçak üzerine yıldırım çarpması durumunda, yaklaşık 200,000 amperlik bir akım oluşur. Oluşan bu akım uçak üzerinde kendine iletken bir yol arar. Genelde uçaklar, gövde ve kanatlar da dahil olmak üzere ağırlık olarak %85 oranında, iyi bir iletken olan alüminyumdan yapıldığı için uçak üzerinde oluşan statik elektrik temel topraklama ve iletkenlik çalışmasıyla uçak yüzeyinden tekrar atmosfere verilmekte ve böylece uçağa zarar vermesi önlenmektedir (Özel ve Töre, 2007).



Şekil 3-3 Uçaklarda elektrik akım yönü (Özel ve Töre, 2007)

Yıldırımın yüksek enerjisi yanında kompozit malzemelerin elektrik iletkenliğini alüminyum, çelik ve titanyuma göre çok düşüktür. Dolayısıyla, kompozit yüzeylerde elektrik iletkenliğini sağlamak için bir takım özel önlemlerin alınması gerekmektedir. İşte bu sebeple, kompozit yüzeyleri yıldırım çarpmasına ve statik elektrik birikmesine karşı korumak, bu malzemelerin uçaklarda ilk defa kullanıldığı 30 yıl öncesinden bu yana önemli bir konu haline gelmiştir (Özel ve Töre, 2007).

Çizelge 3-5 Uçak yapılarında kullanılan malzemelerin direnç değerleri (Özel ve Töre, 2007)

Temas Eden Malzeme Yüzeyleri	Maksimum Direnç Değeri (Ohms)
Alüminyum	0.0005
Çelik	0.0007
Titanyum	0.001
Kompozit	1

Alüminyum gövdeli uçaklarda elektrik iletkenliği, alüminyumun iletkenlik özelliği sayesinde kendi içinde bir çözüm sunarken, kompozit yapılara iletkenlik özelliği kazandırmak için yüzeyin kimyasal (anti-statik kaplama) veya metalik (alüminyum veya bakır folyo tel örgü) malzemelerle kaplanması gerekmektedir.

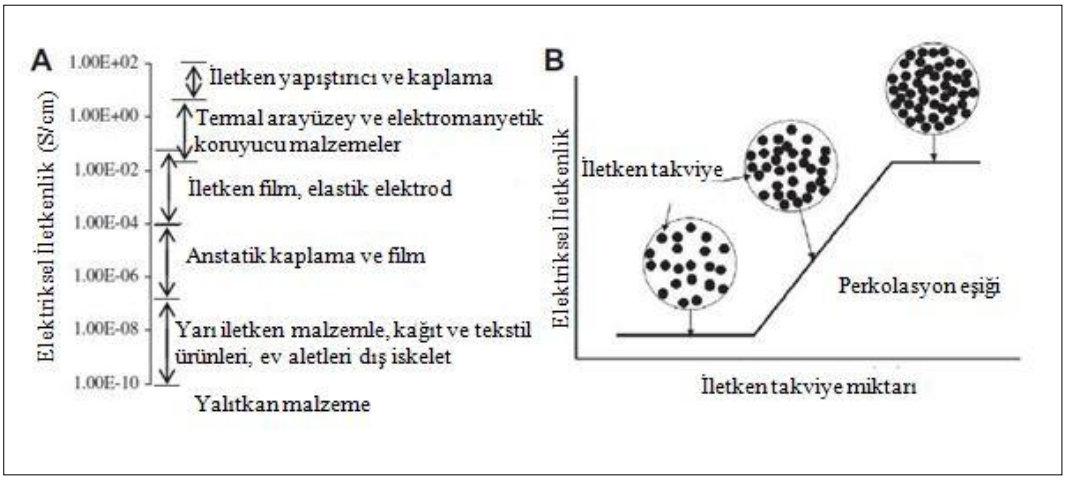
Sonuç olarak yıldırım çarpmasına karşı uygulanacak iletken kaplamanın korozyona karşı direnç sağlamak için izolasyon tabakası ve yapıştırma

gereksinimin olması uçağın ağırlığı yanında elektrik iletkenliği için de bir takım zorlukları beraberinde getirmektedir (Özel ve Töre, 2007).

Bu çalışmada kompozit uçak yapılarında, karşılaşılan sorunları çözmek amacıyla, elektriksel iletkenliği yüksek kompozit yapılar geliştirmek amaçlanmıştır.

3.2. Nanoparçacık Katkısının Elektriksel Özelliklere Etkisi

İletken yapıştırıcılar, antistatik kaplama ve filmler, elektronik cihazlar için elektromanyetik dalga koruyucu malzemeler, termal ara yüzey malzemeleri gibi hacimsel iletkenliği 10^{-10} S/cm 'den yüksek olan elektriksel iletken kompozitler, birçok mühendislik uygulamaları için diğer pahalı olmayan malzemelere nazaran büyük bir öneme sahiptir (Şekil 3-1 A).



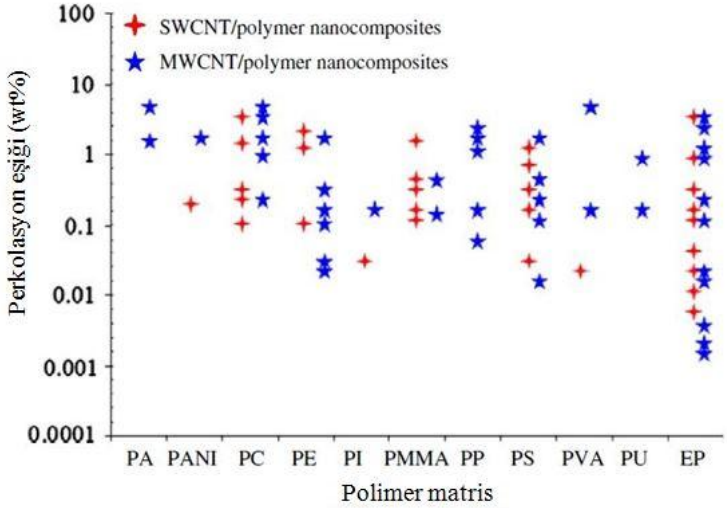
Şekil 3-4 Elektriksel iletkenlik değerleri ve perkolasyon teorisi

Perkolasyon teorisi, iletken takviye malzemesi içeren yalıtkan matris malzemesine sahip olan kompozit malzemelerin; iletken takviye malzemesi miktarı arttığında, kompozitin yalıtkandan iletken malzemeye geçiş davranışını açıklamak için kullanılabilir. Perkolasyon teorisi, sürekli bir elektron doğrultusu ya da iletken bir ağ oluşumu sırasında elektriksel iletkenliğin değerinin bir sıçrama yaparak, ani artış olduğu bu değerdeki kritik takviye malzemesi miktarı olarak açıklanmaktadır. Perkolasyon eşiği altındaki değer aralığında, sürekli bir elektron doğrultusu oluşmadığı için, elektriksel iletkenlikleri matris malzemesi yönlendirmektedir. Perkolasyon eşiğinin üstündeki değer aralıklarında, matris

içerisinde çoklu elektron doğrultuları oluştuğu için, kompozit malzemenin iletkenlik değerlerinin doyma noktasına ulaştığı görülmüştür (Şekil 3-1 B).

Kompozit malzeme içerisinde iletken bir ağ oluşturmak için, iletken takviye malzemesinin miktarının perkolasyon eşiğinin üstünde olması gereklidir. Bilinen iletken takviye malzemeleri, mikro ölçekte metal toz, karbon tanecikleri (carbon black, CB), grafit ve karbon fiberlerdir. Bu takviye malzemeleri ile perkolasyon eşiğine ulaşmak için, takviye malzeme miktarının 10–50 wt.% aralığında olması gerekmektedir ve bu da kompozit malzemenin mekanik özelliklerinde düşme ve yüksek yoğunluk gibi sonuçların doğmasına yol açmaktadır. Nanoparçacıkların polimer içerisine eklenmesiyle üretilen kompozitler bu sorunlara çözüm sunmaktadır. Bilinen takviye malzemelerine kıyasla karbon nanotüp, grafen gibi nanoparçacıkların yüksek boy/en oranları ve yüksek iletkenlik değerleri, düşük miktarlarda polimer matrise eklenmesiyle, yalıtkan özellikte olan kompozit malzemenin iletkenlik değerlerinde artış sağlamaktadır.

Çizelge 3-6 Karbon nanotüplerin polimer matrislere göre perkolasyon eşik değerleri



Grafik 3-1' de gösterildiği üzere çoğu polimer matris malzemesinde, 5 wt.%. 'nin altında karbon nanotüp takviyesi perkolasyon eşiğini geçerek, gerekli iletkenlik değerini sağlamaktadır. Ancak karbon nanotüp/epoksi nano kompozitler ile ilgili yayınlanan makalelerde belirli bir miktarda görüş birliği sağlanmamakla birlikte, bu miktarın karbon nanotüplerin üretim tekniklerine, karbon nanotüp cinsine (DWCNT, MWCNT vb.) bağlı olarak 0.002-7 wt.% aralığında değişiklik gösterebileceği anlaşılmaktadır. Bu geniş aralık, nanoparçacık/polimer nano

kompozitlerin elektriksel iletkenliğinin belirlenmesinde, miktar ile birlikte, nanoparçacıkların yüzey karakterizasyonu, matris içerisinde dağılımı, fonksiyonel grupları ve üretim koşullarının da önemli bir etken olabileceğini göstermektedir. Örnek olarak, Bauhofer' in deneysel parametrelerin karbon nanotüp/epoksi nanokompozitlerde perkolasyon eşiğine etkisi ile ilgili çalışmada, matris içerisinde homojen dağılım sağlanmış olan nanotüp ile üretilmiş olan kompozit malzemenin, matris içerisinde yığın oluşturmuş karbon nanotüp ile üretilen kompozite göre 50 kat yüksek iletkenlik değerleri gösterdiği belirtilmiştir. Tüm bunların ışığında nanoparçacık katkılı polimer matrisli kompozit malzemelerde perkolasyon eşiğinin saptanması için; en/boy oranı, nano ölçekte nanoparçacık yığınlarını önlemek ve mikro boyutta matris içerisinde homojen dağılım sağlamak dikkat edilmesi gereken etmenlerdir (Ma et al., 2010)

Bu çalışmada kompozit yapılarda elektriksel iletkenliği geliştirmek için, nanoparçacık (karbon nanotüp, grafen-oksit) katkılı polimer kompozitler üretilmiştir.

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Çalışmada, nanoparçaçık katkılı epoksi ve karbon fiber kullanılarak, el ile yatırma yöntemi ile tabakalı kompozitler üretilmiştir. Nanoparçacık (Grafen ve karbon nanotüp) etkisinin elektriksel ve mekanik özellikleri incelenmiştir.

4.1. Malzemeler ve Özellikleri

4.1.1. Karbon fiber

Kompozit imalatında kullanılan fiberler Aksa firmasından, fiber üzerlerinde kaplamalı (sizing, A42) olarak temin edilmiştir. Firmadan alınan kaplamalı karbon fiberlerin özellikleri;

Çizelge 4-1 AKSA kaplamalı karbon fiber özellikleri

Kaplamalı Karbon Fiber İçin Özellikler		Çekme Daynanımı		Çekme Modülü		Gerilme	Yoğunluk	
		Ksi	MPa	Msi	GPa	(%)	Ibs/ in^3	g/cm^3
A-38	3K	552	3800	34.1	235	1.6	0.064	1.76
	6K							
A-42	12K	610	4200	34.8	240	1.8	0.064	1.76
	24K							
A-49 (*)	12K	711	4900	34.1	240	2.0	0.065	1.80
	24K							
Test Yöntemi		ISO 10618		ISO 10618		ISO 10618	ISO 10119	
Standart kaplama:Epoksi Fiber çapı: 7 µm (*) Yapım aşamasında								

4.1.2. Epoksi ve sertleştirici

Kullanılan epoksi (Araldite LY 1564 Sp) ve sertleştirici (Aradur 3486) Huntsman firmasından alınmıştır. Epoksi reçinenin ve sertleştiricinin özellikleri;

Çizelge 4-2 Epoksi - sertleştirici özellikleri

Uygulama Alanları	Endüstriyel kompozitler		
Genel Özellikleri	Düşük viskozite ve yüksek esneklik ile yüzey kaplama Uzun raf ömrü		
Uygulama Aşamaları	• Reçine aktarım kalıplama • Islak depolamak • Lif sarımı		
Kimyasal Özellikleri	**AralditeLY 1564 SP**		
	Görünüm	Berrak sıvı	
	Renk (Gardner, ISO 4630)	1-2	
	Viskozite [25°C] (ISO 12058-1)	12-14 gr/ cm^2 s	
	Yoğunluk [25°C] (ISO 1675)	1.1-1.2 gr/ cm^3	
	Alevlenme sıcaklığı(ISO 2719)	185 °C	
	Aradur 3486		
	Görünüm	Hafif sarıya yakın	
	Viskozite [25°C] (ISO 12058-1)	10-20 mPa.s	
	Yoğunluk [25°C] (ISO 1675)	0.94 - 0.95 gr/ cm^3	
Karışım		Ağırlık Oranı	Hacim Oranı
	Araldite LY 1564 Sp	100	100
	Aradur 3486	34	41

4.1.3. Nanoparçacıklar

Nanoparçacık katkılı epoksi/karbon fiber tabakalı kompozit üretimlerinde karbon nanotüp (CNT) ve grafen-oksit (GO) nanoparçacık kullanılmıştır.

4.1.3.1. Karbon nanotüp

Kompozit üretiminde epoksiye katkı malzemesi olarak eklenen karbon nanotüp Baytubes C 150P olup, özellikleri aşağıda tablo olarak verilmiştir.

Çizelge 4-3 Karbon nanotüp özellikleri

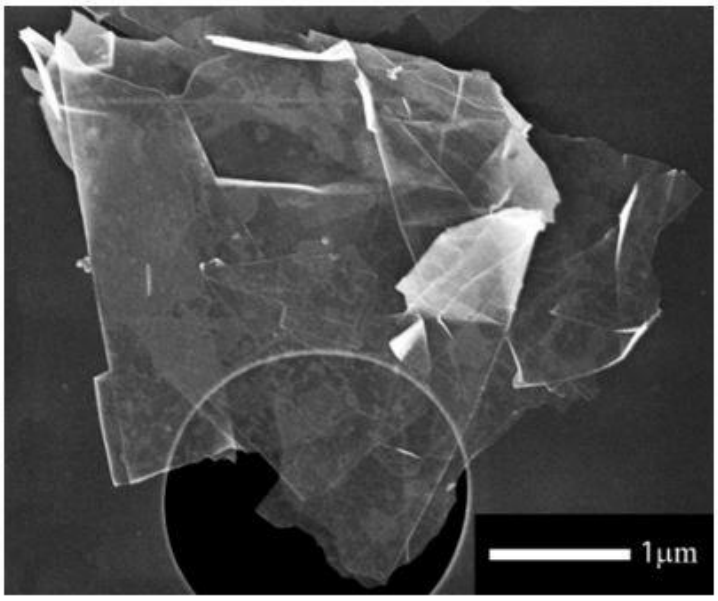
Ürün Tipi	Baytubes C 150P Nanoparçacık > Karbon Nanotüp > Çok duvarlı karbon nanotüp (MWCNT)
Kimyasal Bileşim	Çok duvarlı karbon nanotüp (MWCNT)
Fiziksel Form	Toz
Renk, görünüm	Siyah, yığın
Saflık (wt.-%)	>95
Hacimsel yoğunluk, EN ISO 60 (kg/m^3)	120-170
C-saflık (wt.-%)	>95
Yığın boşluk (>90 wt.-%,), (mm)	0.1 - 1

4.1.3.2. Grafen

Kompozit üretiminde epoksite katkı malzemesi olarak eklenen grafen, graphene-supermarket.com sitesinden nano-toz şeklinde satın alınmıştır. Özellikleri aşağıda tablo olarak verilmiştir.

Çizelge 4-4 Grafen özellikleri

Ürün Tipi	A-12 Grafen Nano toz
Renk	Siyah
Ortalama kalınlık	<3nm (3-8 grafen tabakalar arası)
Yan ölçüler	2-8 mikron



Şekil 4-1 Sem resmi (A-12 Grafen Toz)

Ayrıca, grafen oksidasyon aşamalarında; sülfürik asit (H_2SO_4), nitrik asit (HNO_3), etanol (C_2H_6O) ve aseton (C_3H_6O) kullanılmıştır.

4.2. Yöntem

Modifiye-epoksi/karbon fiber kompozitler, el ile yatırma yöntemi ile üretilmiştir. Epoksi modifikasyonu, belirlenen yüzdelerde iki farklı nanoparçacığın (grafen oksit-GO ve karbon nanotüp-CNT) epoksiye eklenmesiyle sağlanmıştır. Belirlenen nanoparçacık yüzdeleri, bu yüzdelerin kendi içinde dağılımı ve üretilen kompozitlerin isimlendirilmesi aşağıdaki tabloda (Tablo 13) verilmiştir.

Çizelge 4-5 Üretilen kompozitlerin isimlendirilmesi

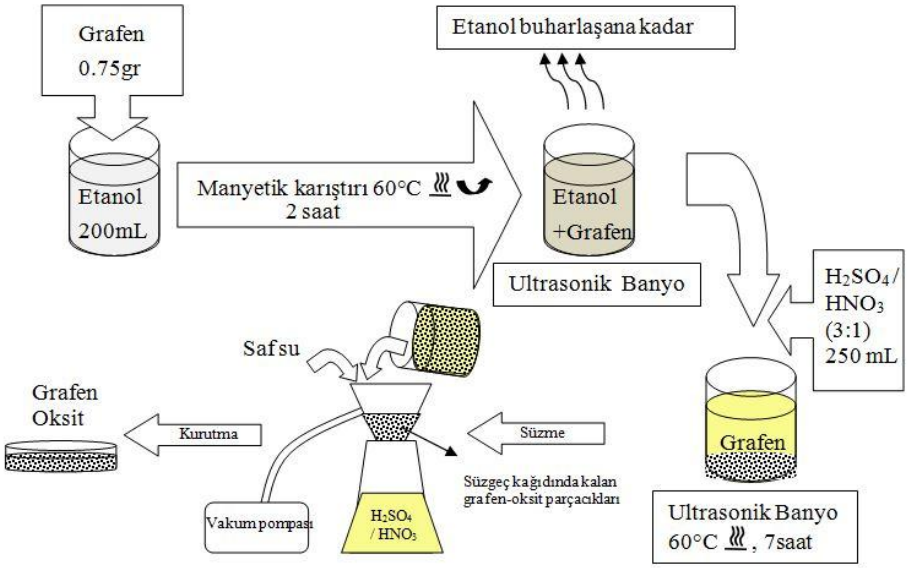
Kompozit	Nanoparçacık yüzdesi (wt%)	Nanoparçaçık Dağılımı		Kompozit	Nanoparçacık yüzdesi (wt%)	Nanoparçaçık Dağılımı	
		CNT(%)	GO(%)			CNT(%)	GO(%)
0.5-100-0	0.5	0	100	2-100-0	2	0	100
0.5-80-20		20	80	2-80-20		20	80
0.5-50-50		50	50	2-50-50		50	50
0.5-20-80		80	20	2-20-80		80	20
0.5-0-100		100	0	2-0-100		100	0
1-100-0	1	0	100	4-100-0	4	0	100
1-80-20		20	80	4-80-20		20	80
1-50-50		50	50	4-50-50		50	50
1-20-80		80	20	4-20-80		80	20
1-0-100		100	0	4-0-100		100	0
7-100-0	7	0	100	15-0-100	15	0	100
7-80-20		20	80	15-80-20		20	80
7-50-50		50	50	15-50-50		50	50
7-20-80		80	20	15-20-80		80	20
7-0-100		100	0	15-0-100		100	0
10-100-0	10	0	100				
10-80-20		20	80				
10-50-50		50	50				
10-20-80		80	20				
10-0-100		100	0				

Yukarıdaki tabloda da belirtildiği üzere toplamda otuz beş (35) tip kompozit üretimi gerçekleştirilmiştir. Kompozit üretimine geçilmeden önce grafen nanoparçacıklar oksidasyon işlemine tabi tutulmuştur.

4.2.1. Grafen oksidasyon işlemi

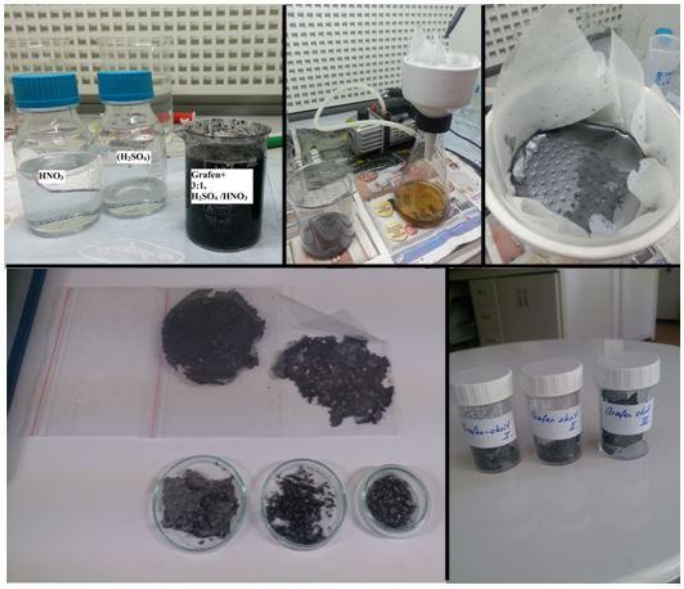
Bu işlemde; grafenlere, Laachachi *et al*. (2007)'nin karbon nanotüplere uyguladıkları kimyasal oksidasyon metodu uygulanarak oksidasyon işlemi yapılmıştır. Metodun amacı grafen yüzeylerinde karboksilik asit grupları oluşturarak, grafen yüzeylerini fonksiyonalize etmektir. Bu çerçevede; üretilecek kompozitte bulunacak nanoparçacık yüzdesine göre hesaplanan grafen miktarı ve 200 ml'lik etanol (C_2H_6O) bir beher içine konularak, manyetik karıştırıcıda

60°C'de iki saat (2s) karıştırılmıştır. Daha sonra ise manyetik karıştırıcıdan alınan grafen–etanol karışımı, ethanol buharlaşıncaya kadar ultrasonik banyoda karıştırılmıştır. Bu işlemler, nano boyutlardaki grafen tabakalarının birbirinden ayrılması; topaklanmaması ve dibe çökememesi için yapılmıştır. Bu sayede, beher içinde sadece birbirinden ayrılmış grafen nanopartiküller kalmıştır.



Şekil 4-2 Grafen oksidasyon işlem şeması

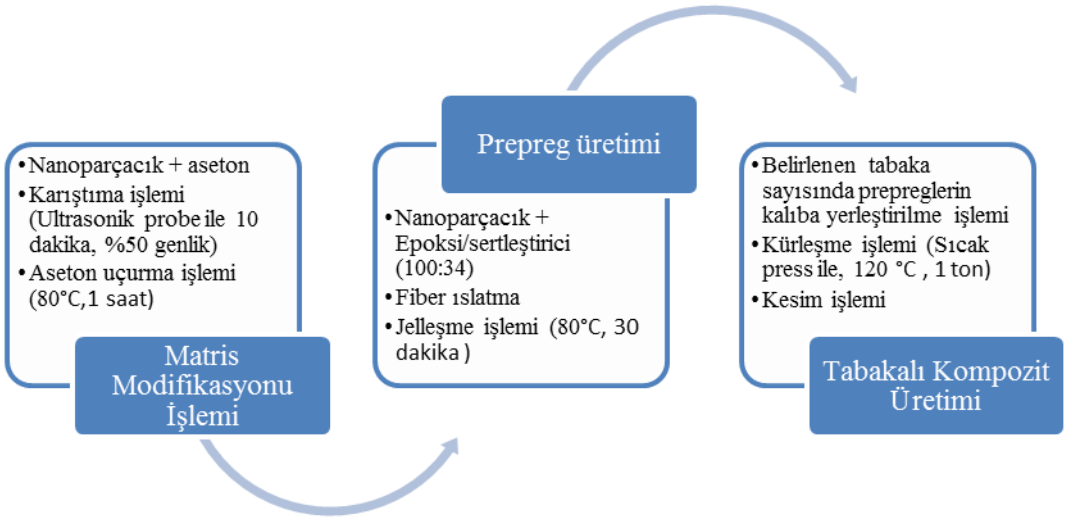
Bu işlemlerin ardından, beherde üçe bir (3:1) oranında 250 ml'lik sülfürik asit (H_2SO_4) / nitrik asit (HNO_3) çözeltisi oluşturulmuştur. Çözelti ve grafen dolu beher, 60°C'de ultrasonik banyoda yedi (7s) saat karıştırılmış, ardından oda sıcaklığında soğumaya bırakılmıştır. Soğuyan çözelti, deiyonize su ile seyreltildikten sonra vakum süzme düzeneğine bağlanan filtre kâğıttan su trompu yardımıyla süzülmüştür. Bu işlem birkaç kez tekrar edilmiş ve filtre kâğıtlar üzerinde biriken grafen oksitler, kâğıt malzemeden alınarak 70°C'de etüv içinde kurutulmuştur. Bu işlemin ardından grafen oksitler havanda dövülerek toz haline getirilmiş ve son olarak kimyasal okside olmuş grafen oksitler (GO) üretilmiştir.



Şekil 4-3 Grafen oksidasyonu

4.2.2. Kompozit üretimi

Nanoparçacık katkısının kompozit malzemelerde elektriksel ve mekanik etkisini incelemek amacıyla yapılan bu çalışmada, kompozitler sekiz (8) tabaka olarak üretilmiştir. Nanoparçacık katkılı epoksi ve karbon fiber ile üretilmiş olan kompozitlerin üretim süreci aşağıda belirtilen yol izlenerek gerçekleştirilmiş.



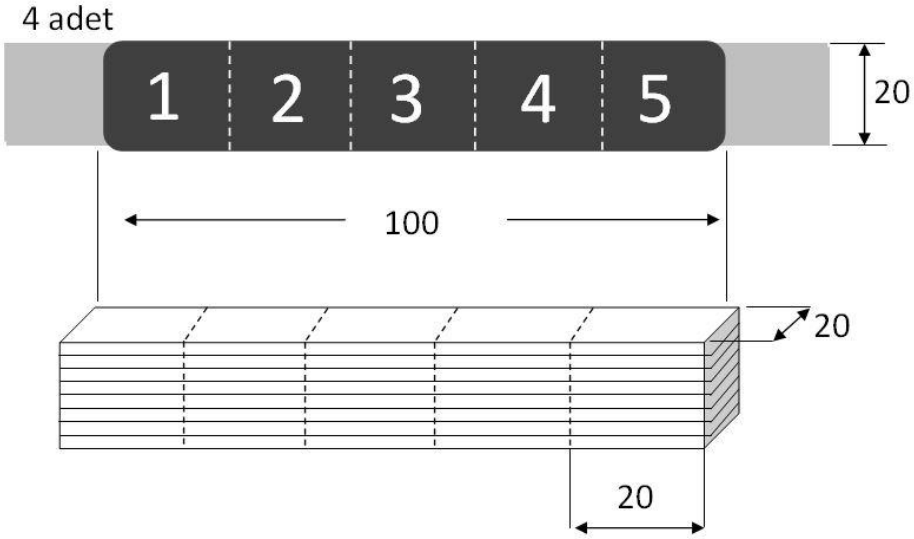
Şekil 4-4 Kompozit üretim şeması

Elektriksel ve mekanik test ölçümleri için belirlenen boyutlar (Elektriksel; 20 mm x 20 mm x 1 mm, ILLS; 10 mm x 20 mm x 1 mm) göz önüne alındığında, kompozit üretimi için deneysel aşamada kullanılacak olan karbon fiber, ölçüleri

20 mm x 150 mm x 1 mm olan galvanize çeliklere sarılarak; galvanize çeliğin 20 mm x 100 mm yüzey alanına sahip yüzeylerinden, bu yüzey ölçülerine sahip iki (2) adet prepreg elde edilmesi planlanmıştır. Fiberlerin sağlıklı bir şekilde galvanize kalıplara sarılması için çelikler teflon ile kaplanmıştır.

Şekil 4-5 Galvaniz çeliklere fiber sarma işlemi

Toplamda beş (5) adet numune elde edebilmek için dört (4) adet galvanize çelik (4 adet x 2 yüz = 8 adet 20 x 100 mm prepreg) karbon fiber sarılmıştır.



Şekil 4-6 Galvaniz çeliğe sarılan fiber ölçüleri

Bir galvaniz çelik kalıptan iki (2) adet 20 mm x 100 mm prepreg elde etmek için sarılması gereken karbon fiber uzunluğu bir (1) m olarak ölçülmüştür. Bir (1) m karbon fiberin ağırlığı tartılarak 0.858 gr bulunmuştur. Kompozit

üretimlerinde fiber hacim oranı %60 olarak alınıp ilgili hesaplamalar bu orana göre yapılmıştır. Üretim için gerekli olan matris miktarı;

$$\frac{V_{fiber}}{V_{kompozit}} = \frac{m_{fiber} / \rho_{fiber}}{m_{kompozit} / \rho_{kompozit}}$$

Denklem 4.1

eşitliğinden (Denklem 4.1) $m_{kompozit}$ (gr) çekilerek hesaplanmıştır. Kompozit miktarı, epoksi + sertleştirici miktarı olarak bulunmuş olup, epoksi/sertleştirici oranı üretici firma verilerine göre kütlece 100:34 olarak alınmıştır.

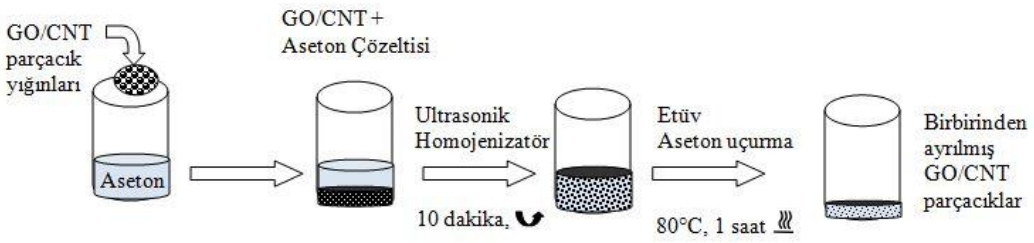
Matris miktarına bağlı olarak ağırlıkça yüzdeleri 0.5, 1, 2, 4, 7, 10 ve 15 olan nanoparçacıkların miktarları, matris içerisindeki dağılımlarına (100-0, 80-20, 50-50, 20-80, 0-100) göre aşağıdaki eşitlik (Denklem 4.2) kullanılarak hesaplanmıştır.

$$m_{nanopar\ çacık} = m_{kompozit} \times \%\ \text{nanoparçacık} \times \%\ \text{nanoparçacık dağılımı}$$

Denklem 4.2

4.2.2.1. Matris modifikasyon işlemi

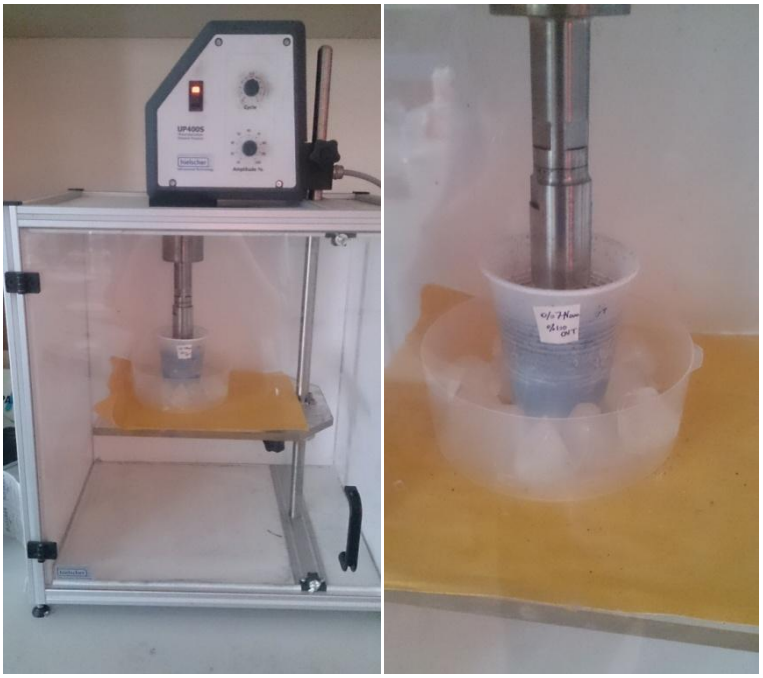
Kompozit üretimlerinde matris modifiye işlemi, hesaplanan GO ve CNT nanoparçacık yüzde dağılımlarına göre, gerekli miktarların matrise eklenmesiyle gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4-7 Matris modifikasyon şeması

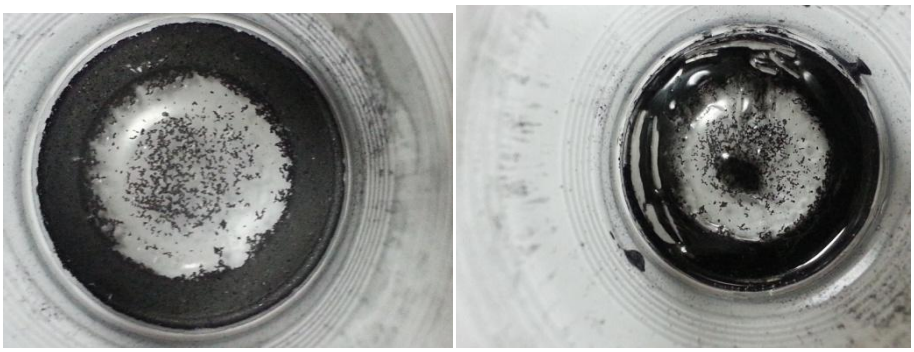
Hesaplanan nanoparçacık miktarları grafen ve karbon nanotüp dağılımında etkili bir aracı olan aseton çözeltisi içerisinde ultrasonik homojenizatör (Hielscher

UP400S, Ege Üniversitesi Bölümü, Makine Mühendisliği Bölümü) yardımıyla buz banyosu içerisinde 10 dakika boyunca %50 genlikte çözülmüştür.



Şekil 4-8 Ultrasonik Homojenizatör

Aseton içerisinde homojen olarak çözülen nanoparçacık-aseton çözeltisi, etüve (Vakumlu Fırın, Nüve EV 018, Ege Üniversitesi Bölümü, Makine Mühendisliği Bölümü) yerleştirilerek (80°C, 1 saat), aseton uçurma işlemi gerçekleştirilmiştir. Asetonun uçması sonucu nanoparçacıklar epoksi ile karıştırılarak modifikasyon işlemi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4-9 Aseton uçurma işlemi sonrası nanoparçacıklar

4.2.2.2. Prepreg üretimi

Modifiye edilmiş olan epoksiye 100:34 oranında sertleştiricisi eklenerek karıştırılmıştır. Teflon kaplanmış olan galvaniz kalıplara el ile sarılmış olan karbon fiberler, modifiye edilmiş olan epoksi reçine ile şırınga ve spatül yardımıyla sürekli tartım alınarak ıslatılmıştır.

Şekil 4-10 Fiber sarma ve ıslatma işlemi

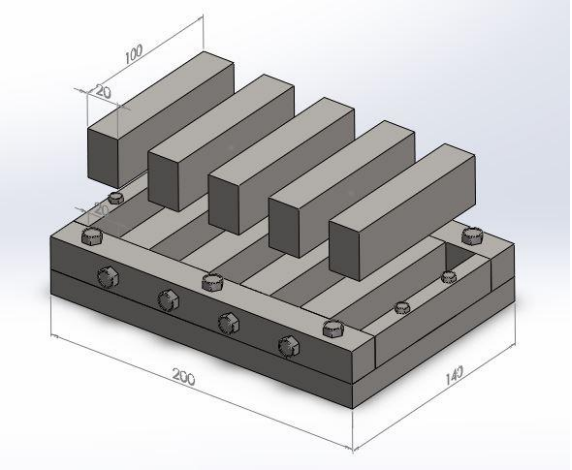
Islatılan fiberler, epoksinin temin edildiği firma bilgilerine göre jelleşme süresi-30 dakika boyunca 80°C 'de etüvde tutulmuştur. Jelleşme sonrası etüvden alınan prepregler galvanizde çıkarılma işlemine kadar buzlukta saklanmıştır.

Şekil 4-11 Jelleşme için etüve koyulan prepregler

4.2.2.3. Tabakalı kompozit üretimi

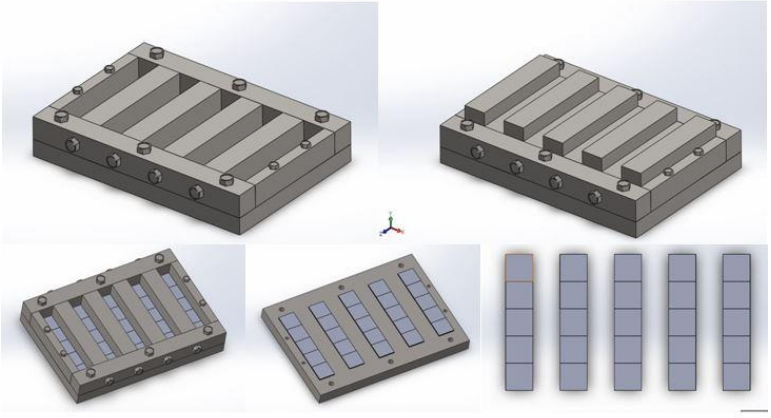
4.2.2.3.1. *Kalıp üretimi*

20 mm x 20 mm boyutlarında 8 tabakalı kompozit elde edebilmek için kalıp imalatı gerçekleştirilmiştir. Belirlenen boyutlarda kalıp üretimi için gerekli tasarım SOLIDWORKS programı kullanılarak çizilmiştir.



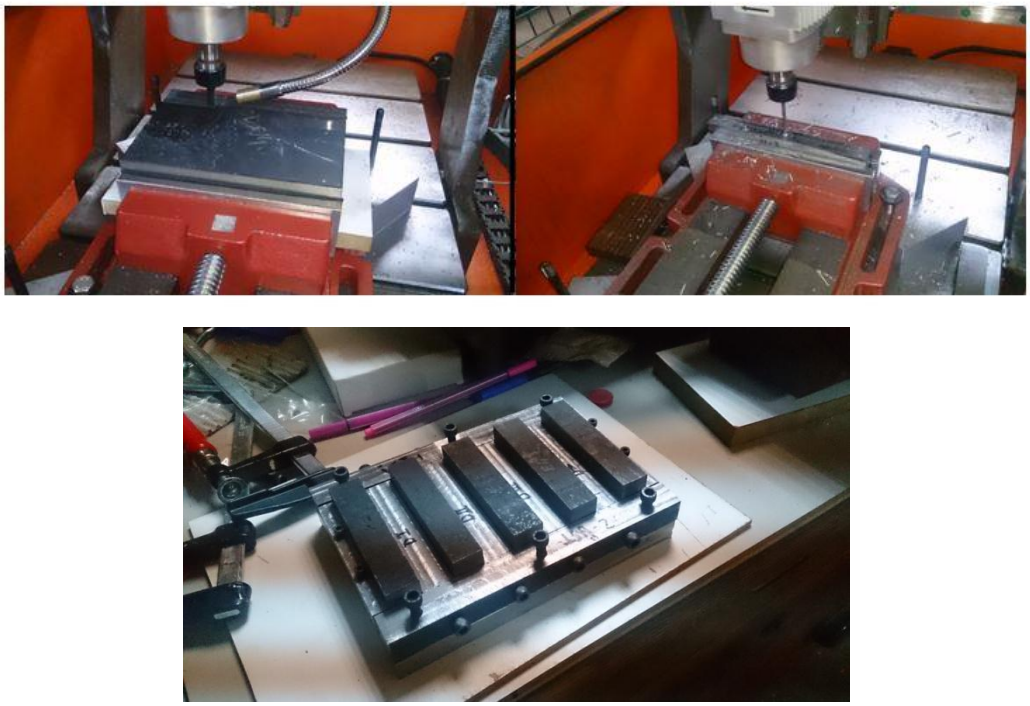
Şekil 4-12 Kalıp tasarımı

Kalıp içerisinde oluşturulan dişi boşluklara üst üste yerleştirilecek olan prepregler, erkek kalıp ile bastırılarak istenen ölçülerde tabakalı kompozit elde edilmesi planlanmıştır.



Şekil 4-13 Kalıptan çıkarılacak olan kompozit tasarımı

Tasarlanan ölçülerde temin edilen C1045 imalat çelikleri CNC Router (Probotsan, Ege Üniversitesi Bölümü, Tekstil Mühendisliği Bölümü) ' da yüzey işleme ve delik açma işlemleri yapılarak kalıp üretimi gerçekleştirilmiştir.



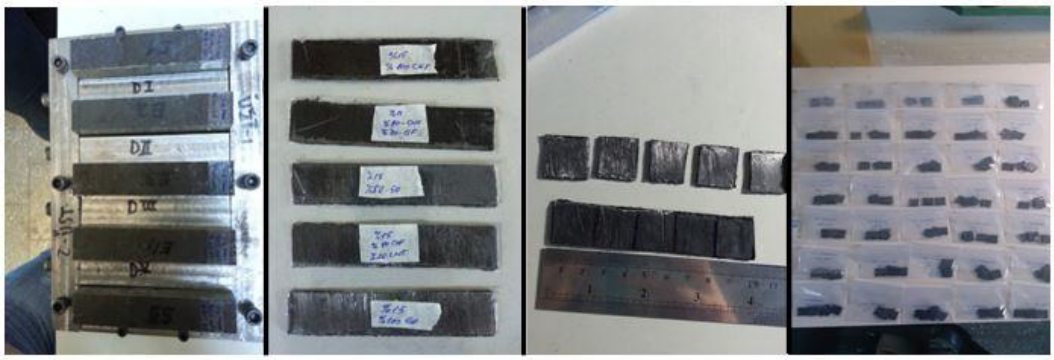
Şekil 4-14 Kalıp imalatı

4.2.2.3.2. *Kompozit üretimi*

Jelleşme sonrası galvanize kalıplardan çıkarılan prepregler, sekiz (8) tabaka olacak şekilde üst üste yerleştirilip, üretilen kalıba yerleştirilmiştir. Kürleşme için, sıcak prese (Delta Isıtmalı Press, Ege Üniversitesi Bölümü, Tekstil Mühendisliği Bölümü) koyularak, 2 saat 120°C 'de 1 ton (50 bar) basınç altında tutulmuştur.

Şekil 4-15 Kalıba koyulan tabakalı kompozitlerin ısıtmalı press yardımıyla üretimi

Kürleşme sonrası kalıp oda sıcaklığında soğumaya bırakılmıştır. Kalıptan çıkarılan 20 mm x 100 mm ölçülerindeki 8 tabakalı kompozitler elektriksel testler için şerit testere yardımıyla 20 mm x 20 mm boyutlarında kesilerek kompozit üretimi tamamlanmıştır. Kompozit üretimi sonunda 35 tip numune üretilmiştir.

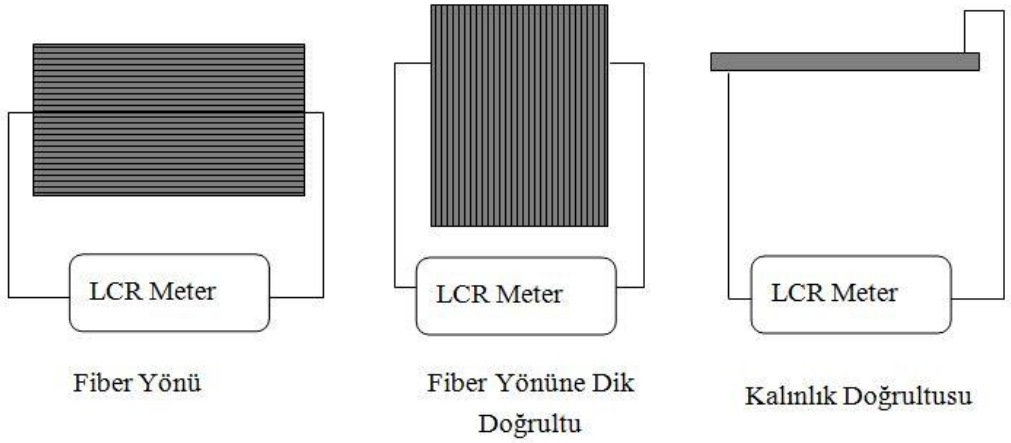


Şekil 4-16 Kalıptan çıkarılan kompozitlerin test aşaması için kesim işlemi

4.2.3. Testler

4.2.3.1. Elektriksel iletkenlik testi

Üretilen kompozitlerin nanoparçacık katkısıyla, elektriksel iletkenlik özelliklerindeki değişim incelenmiştir. Bunun için, kompozitlerin fiber yönü, fiber yönüne dik ve kalınlık doğrultusunda elektriksel iletkenlikleri, kurulan düzenek sayesinde ölçülerek hesaplanmıştır.



Şekil 4-17 Elektriksel iletkenlik test için numune ölçüm yönleri

Şekil 4-18 Elektriksel test a-) Fiber yönü b-)Fibere dik c-) Kalınlık doğrultusu

Resim 4-1

Elektriksel özelliklerin belirlenmesi için, AC iletkenlik değerleri ölçümü, masa tipi LCR Meter (Gw INSTEK LCR-821 340, Ege Üniversitesi Bölümü, Makine Mühendisliği Bölümü) ile gerçekleştirilmiştir. Numunelerin ölçümleri yapılırken, ölçüm yapılan yüzeylere bakır levha yapıştırılmıştır. Her bir numune tipinden 5 adet test edilmiştir.

Ölçümler;

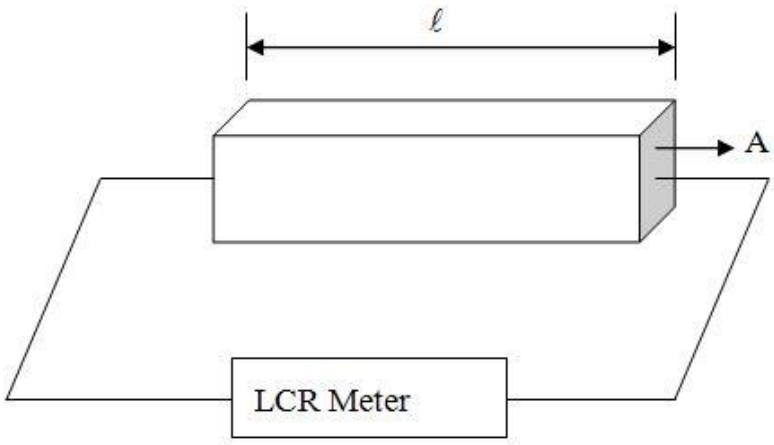
Frekans (F) = 10 kHz
Gerilim (V) = 1 V değerlerinde yapılmıştır.

Her bir numune için üç ayrı yönde direnç (R) değerleri okunarak; Denklem 4.3 kullanılarak elektriksel iletkenlik değerleri hesaplanmıştır.

$$\frac{1}{R} = \frac{\sigma \times A}{l}$$

Denklem 4.3

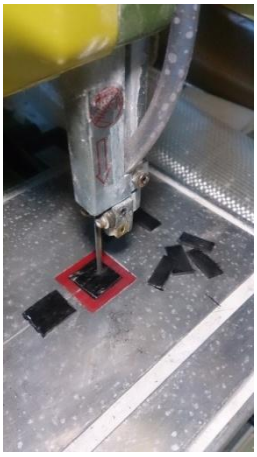
R : Direnç (Ω)
σ : Elektriksel İletkenlik (Siemens/mm)
A : Yüzey Alanı
ℓ : Uzaklık



Şekil 4-19 Elektriksel iletkenlik hesaplanması

4.2.3.2. Kısa kiriş kayma testi (Short beam shear test)

Elektriksel iletkenlik ölçümlerinden sonra numuneler, kısa kiriş kayma testi için 10 mm x 20 mm ölçülerinde kesilmiştir (Kumar et al.,2012).



Şekil 4-20 ILLS testi için numune kesim işlemi

Üretilen kompozitlerde tabakalar arası kayma dayanımını (ILSS–Interlaminar Shear Stress) hesaplamak için DIN 29971 standardını kullanılarak kısa kiriş kayma testi uygulanmıştır. Bu deney gerçekleştirirken üç nokta eğilme aparatı kullanılmıştır. Eğilme aparatının yükleme piminin çapı ve iki destek piminin çapları 6 mm'dir. Deneyler, 5 kN'luk yük kapasitesine sahip Shimadzu marka AUTOGRAPH AG – IS serisi universal test makinasında gerçekleştirilmiştir. Eğilme hızı 1 mm/dak'dır (ASTM D2344). Her bir numune tipinden 3 adet test gerçekleştirilmiştir. Tabakalar arası kayma dayanımı, Denklem 4.4 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\tau = 0.75 \times \frac{F_{max}}{b \times t} \qquad \textit{Denklem 4.4}$$

τ : Kayma Dayanımı (N/mm^2 - Mpa)

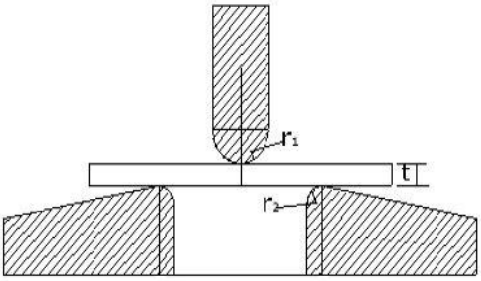
F_{max} : Max. Kuvvet (N)

b : Numune genişliği (mm)

t : Numune kalınlığı (mm)

r1 : Yükleme pim yarıçapı, 3 mm

r2 : Destek pim yarıçapı, 3mm



Şekil 4-21 ILLS testi

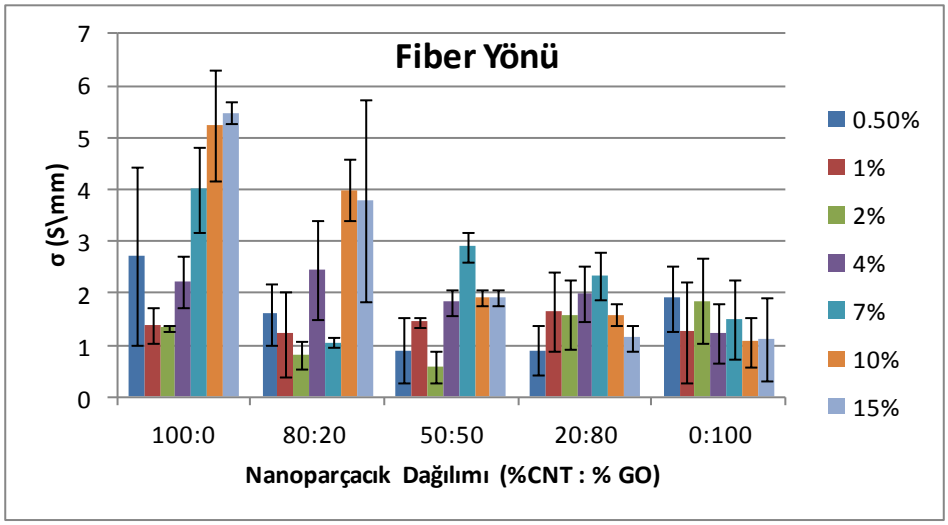
Şekil 4-22 ILLS testi uygulaması

5. BULGULAR

5.1. Elektriksel İletkenlik Test Bulguları

Elektriksel iletkenlik değerleri, nanoparçacık yüzdelerine ve bu nanoparçacıkların matris içerisinde yüzde dağılımına göre, ayrıca fiber yönü, fiber yönüne dik ve kalınlık doğrultusunda hesaplanmıştır. Hesaplanan değerler aşağıda grafik olarak verilmiştir.

Çizelge 5-1 Fiber yönü elektriksel iletkenlik değerleri

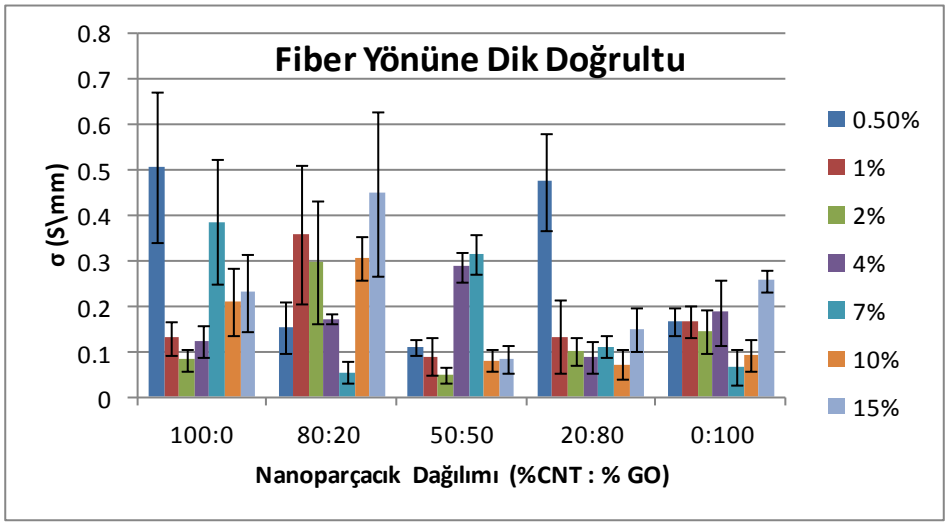


Fiber yönünde alınan ölçümler sonucunda, %0.5 değerinden sonra azalan iletkenlik değerleri 4% katkıda tekrar artarak, en yüksek değere 15-100-0 (5.47 S/mm) 'de ulaşmıştır. Literatür değerleri ile karşılaştırıldığında, CNT için verilen perkolasyon eşiği değer aralığı 0.002-7 wt.% olarak verilmiş olup (Ma et al.,2010), bu çalışmada bu değerin % 0.5 değerinin altında olduğu düşünülmüştür. CNT nanoparçacık etkisinin incelendiği 100-0 numunelerinin iletkenlik değeri, %0.5 katkıda perkolasyon eşiği aralığında olup, %1-2 katkı yüzde değerlerinde perkolasyon eşik aralığını geçerek doyum noktasına ulaşmış ve düşüşe neden olmuştur. CNT yüzdesinin artmasıyla matris içerisinde çoklu elektron doğrultuları oluştuğu için tekrar artışa neden olduğu düşünülmüştür (Ma et al., 2010).

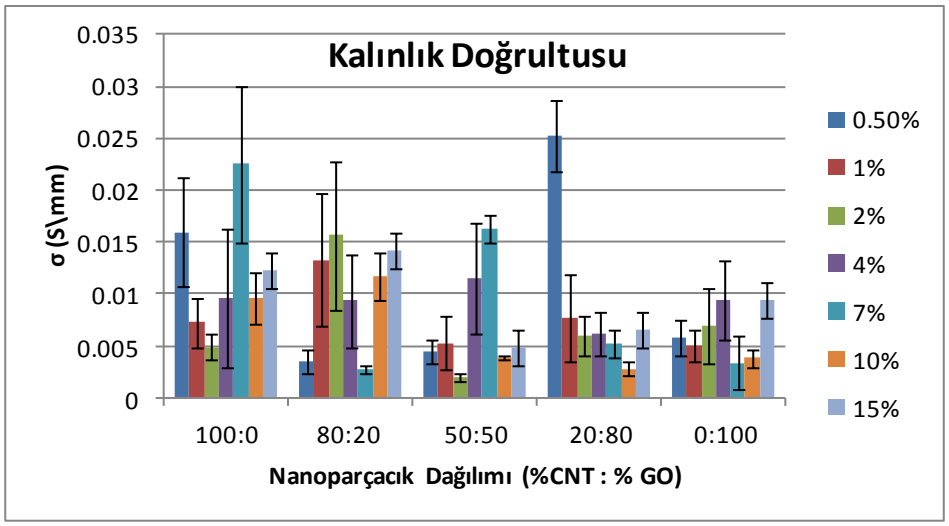
%4 değerlerinde nanoparçacık dağılımının etkisi değişmemiş, iletkenlik değerleri sabit değer aralığında kalmıştır. %2 katkılı kompozitlerde, GO artışıyla birlikte iletkenlik değerleri de artmıştır. 80-20 dağılımına sahip numunelerde, GO eklenmesiyle iletkenlik değerlerinde düşüş gözlenmiştir. Düşük miktarda GO katkısı sonucu, karbon fiber yönündeki GO nanoparçacıkların matris içerisinde oluşturdukları elektron doğrultusunu bozmaları sonucu bu düşüşün ortaya çıktığı varsayılmıştır. 80-20, 50-50 ve 20-80 dağılımlarındaki iletkenlik değerlerinin, 0-

100'e ait numunelerin iletkenlik değerlerinden yüksek olması, CNT-GO etkisi sonucu oluşan temas geometrisinin 0-D nokta geometrisinden 1-D doğrusal geometriye değişmesi sonucu, nanoparçacık boyunca elektriksel direncin düşmesi sonucunda ortaya çıktığı varsayılmıştır (Yua et al., 2008). %10 ve %15 değerlerinin, CNT dağılımıyla doğru orantılı bir yol izlediği gözlenmiştir.

Çizelge 5-2 Fiber yönüne dik doğrultuda elektriksel iletkenlik değerleri



Çizelge 5-3 Kalınlık doğrultusunda elektriksel iletkenlik değerleri



Fiber yönüne göre, fiber yönüne dik ve kalınlık doğrultusunda iletkenlik değerlerinin düşük çıkması, fiber yönündeki değerleri karbon fiberlerin üstlenmesidir. İletkenlik en yüksek değerine, fiber yönüne dik doğrultuda 0.5-100-0 kompozitinde, kalınlık doğrultusunda ise 0.5-20-80 kompozitinde ulaşmıştır. 0-100 dağılımında perkolasyon eşiği etkisiyle %0.5 katkıdan sonra tekrar bir azalma

gözlenmiştir. Genel olarak fiber yönüne dik ve kalınlık doğrultusunda iletkenlik değerlerini CNT katkısının etkilediği görülmüştür.

İletkenlik değerlerinde, %10 ve 15 katkılarında üç doğrultu da CNT katkısı ile artış gözlenirken; GO katkısıyla iletkenlik değerlerinde büyük bir değişim gözlenmemiştir. CNT/GO etkileşiminin ve optimum iletkenlik değerlerinin 4-50-50 numunelerinde elde edildiği söylenebilir.

Havacılıkta kullanılan CNT katkılı karbon fiber/epoksi kompozitlerde elektriksel iletkenliği geliştirilmesi amacıyla yapılan bir çalışmada, sekiz (8) tabakalı %0.4 çift duvarlı CNT (DWCNT) katkılı kompozitler üretilmiş, kalınlık doğrultusunda iletkenlik değeri $2.17x10^{-4}$ S/mm olarak verilmiştir (Lonjon et al., 2012). Tek yönde sıralanmış karbon fiber/ epoksi kompozitlerde %0.4 çift duvarlı CNT (DWCNT) katkısı ile yöntem ve elektriksel karakterizasyonu incelenmiş, tabakalı kompozit (8 tabakalı) imalatı gerçekleştirilerek, kalınlık doğrultusunda $108x10^{-6}$ S/mm, fiber yönüne dik doğrultuda $18x10^{-4}$ S/mm ve fiber yönünde 6.3 S/mm iletkenlik değerlerinin bulunduğu belirtilmiştir (Sawi et al., 2012). Nano tabakalı grafen kaplamalı on iki (12) tabakalı karbon fiber/epoksi kompozit malzemelerin mekanik ve elektriksel özelliklerinin incelendiği bir başka çalışmada, %0.4 grafen çözeltisi kaplı karbon fiber/epoksi kompozitlerinde elektriksel iletkenlik değerleri $7x10^{-3}$ S/mm ölçülmüştür (Qin et al., 2014). Bu çalışmada bulunan, nanoparçacık dağılımından bağımsız olarak nanoparçacık katkısına göre değer aralıkları aşağıda tablo olarak verilmiştir.

Çizelge 5-4 Kompozitlerin iletkenlik değer aralıkları ve ilgili referanslar ile karşılaştırılması

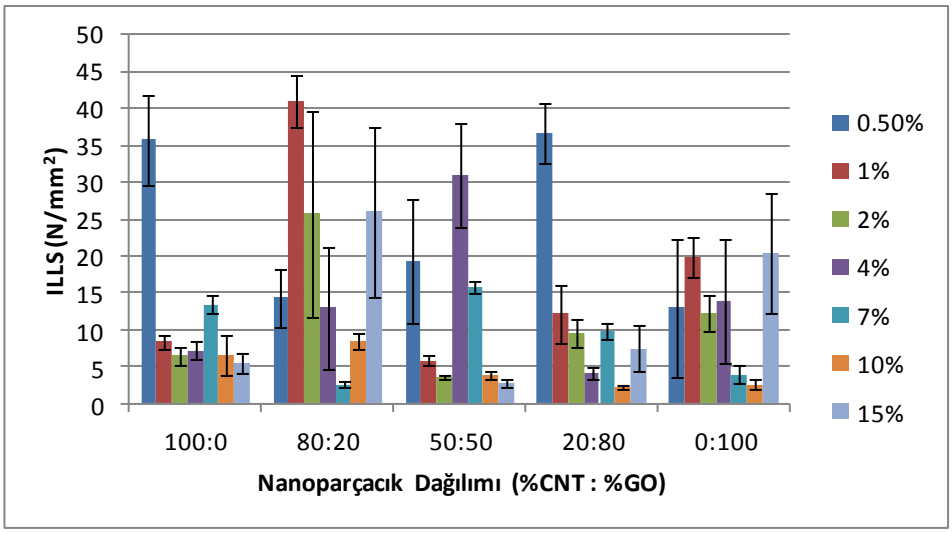
Nano parçacık yüzdesi %	**Fiber Yönü (S/mm)**	**Fiber Yönüne Dik Doğrultu (S/mm)**	**Kalınlık Doğrultusu (S/mm)**	**Referans**
0	0.95	0.0023	$74x10^{-5}$	
	6.2	0.0007	$15x10^{-6}$	*Sawi et al.*
	-	-	$7.1x10^{-6}$	*Lonjon et al.*
0.5	0.89 - 2.72	0.10 - 0.5	0.0030 - 0.025	
	6.3	0.0018	$108x10^{-6}$	*Sawi et al., %0.4 DWCNT*
	-	-	$217x10^{-6}$	*Lonjon et al., %0.4 DWCNT*
1	1.21 - 1.65	0.09 - 0.35	0.0052 - 0.013	
2	0.58 - 1.85	0.04 - 0.29	0.0019 - 0.015	
4	1.22 - 2.45	0.11 - 0.28	0.0050 - 0.011	
7	1.06 - 4.00	0.05 - 0.38	0.0028 - 0.022	
10	1.07 - 5.23	0.07 - 0.30	0.0028 - 0.014	
15	1.12 - 5.47	0.08 - 0.44	0.0049 - 0.014	

Tablo5-1' deki değerlere göre nanoparçacık eklenmemiş karbon fiber/ epoksi kompozitlere göre en düşük değere göre fiber yönünde %38, fibere dik doğrultuda %94, kalınlık doğrultusunda %75, en yüksek değere göre fiber yönünde %82, fibere yönüne dik doğrultuda %98, kalınlık doğrultusunda %97 artış sağlanmıştır. Nanoparçacık eklenmemiş kompozitlere ve literatür değerlerine göre sağlanan bu artış nanoparçacık yüzdesinin ve matris içerisine CNT-GO dağılımının, GO oksidasyonu sonucu yüzeyinde oluşan fonksiyonel gruplar sonucu ortaya çıkmış olabileceği saptanmıştır. Tüm bunların yanında, yayınlanan diğer çalışmalarda kullanılan üretim yöntemlerine kıyasla, bu çalışmada homojen bir dağılım sağlanması ve iletkenlik değerlerinden yüksek verim elde edilmesi amacıyla kompozit üretim ölçeği küçültülerek, tabakalı kompozitler 20 mm x 100 mm ölçülerinde üretildiği için, nanoparçacık katkısının numunelerde elektriksel etki oranını arttırdığı düşünülmüştür.

5.2. Kısa Kiriş Kayma Test Bulguları

Kısa kiriş test uygulaması ASTM 2344 ve DIN 29971 standartlarına göre gerçekleştirilmiş olup, test sonuçları aşağıda grafik olarak verilmiştir.

Çizelge 5-5 Kısa kiriş kayma test (ILLS) değerleri



20-80 numunelerinde GO katkısıyla birlikte kayma mukavemetinde artış sağlanmıştır. Nanoparçacık %7-10 katkısından sonra değerlerde azalma görülmüştür. CNT içeren, 100-0 numunelerinde %0.5 katkısında genel olarak yüksek mukavemet değerleri görülse de, nanoparçacık artışıyla değerlerde düşme oluşmuştur. %0.5-7 değer aralığında GO katkısı genel olarak değerleri yükseltmiştir. 50-50 dağılımda en yüksek değer %7 nanoparçacık katkısında bulunmuştur. Genel grafikte maksimum değer 1-80-20 değerinde görülmüş,

yüksek kayma mukavemetine sahip nanoparçacık katkısı %0.5, nanoparçacık dağılımı ise 80-20 oranında saptanmıştır. Literatür değerlerine göre katkısız epoksi / karbon fiber yedi (7) tabakalı kompozitlerin ILLS değeri 21.1 MPa, %0.1 GO katkılı kompozitlerin ILLS değeri 24.824 MPa' dır (Acar, 2013). %0.5 MWCNT katkılı epoksi/karbon fiber kompozitlerin ILLS değerlerinin ortalama 5±0.75 MPa olduğu bir başka çalışmada belirtilmiştir (Shekar, 2014)

6. SONUÇ

CNT ve GO nanoparçacık katkısının, karbon fiber/epoksi tabakalı kompozitlerinde elektriksel iletkenliği arttırması yönünde yapılan bu çalışmada, kompozitlerde nanoparçacık katkısının olumlu sonuçlar verdiği görülmüştür. Düşük miktarlardaki nanoparçacık etkisi, kompozitlerin elektriksel direncini düşürerek iletken malzeme özelliği kazanmasını sağlamıştır. Kompozit uçak yapılarında CNT ve GO katkısının, elektriksel iletkenlik değerlerinde önemli bir artış sağladığı bu çalışmada gösterilmiştir. Nanoparçacık yüzdesinin artması sonucu, hem elektriksel hem de mukavemet değerlerinde doyma noktasına ulaşıldığı için azalma görülmesi sonucu, düşük miktarlardaki nanoparçacık katkısının etkisinin daha fazla olduğu söylenebilmektedir.

Nanoparçacık dağılımına göre iletkenlik değerleri karşılaştırıldığında, CNT etkisinin GO'ya göre daha üstün geldiği görülmüştür. İletkenlik değerlerinde oluşan artışın nanoparçacık katkısına, nanoparçacık dağılıma, grafene uygulanan oksidasyon işlemi sonucu yüzeyinde oluşturulan fonksiyonel gruplara ve üretim yöntemi etkenlerine bağlı olduğu gösterilmiştir. Bu çalışmada; iletkenlik değerlerinin yukarıda bahsedilen nedenlere bağlı olması sonucu, iletkenliğin arttırılmasına yönelik devam edecek çalışmalarda, matris içersinde nanoparçacık dağılımına önem verilmesi gerektiği ortaya konmuştur. Ayrıca sadece CNT ve GO içeren kompozit üretimi sonucu; bu kompozitlere ait perkolasyon eğrilerinin çıkarılacağı bir çalışma yapılması bu değerlerin karşılaştırılması adına çıkarılan sonuçların daha anlamlı olacağı düşünülmüştür. Üretim yönteminde yapılacak iyileştirmelerle birlikte, üretimden kaynaklı kusurların ortadan kalkacağı ve nanoparçacıkların elektriksel iletkenlik ağ oluşumu için daha iyi bir yol izleyerek, iletkenlik değerlerinde daha stabil değerler yakalanacağı düşünülmüştür.

KAYNAKLAR DİZİNİ

Acar, V., 2013, Karbon İplik Dolgulu Termoset Film Kompozitlerde Ara yüzey Çalışmaları, Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi, Erzurum (yayınlanmamış).

Agarwal, B.D., Broutman L.J. and Chandrashekhara K., 2006, Analysis and Performance of Composites.

Aran, A. ve Afacan, M., 1988, Karbon Elyaf Takviyeli Karma (Kompozit) Malzemeler, Mühendis ve Makina Dergisi, 345, İstanbul .

Arıcan, M. L., 2003, Uçak Sanayiinde Kullanılan Kompozit Malzemeler, (Bitirme Çalışması), Kocaeli.

ASTM (American Society for Testing and Materials) **D2234**

Autar, K. K., 2006, Mechanics of Composite Materials, Taylor & Francis Group.

Baker, A., Dutton, S. and Kelly, D., 2004, Composite Materials for Aircraft Structures, American Institute of Aeronautics Inc.

Bilgin, İ., 2010, Kompozit Disklerde Termal Gerilme Analizi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, İzmir (yayınlanmamış).

DIN (Deutsches Institut für Normung) 29971.

Goldstain A., 1997, Handbook of Nanophase Materials, Marcel Dekker Inc, New York.

Kaya Ş., Ekim 1987, Kompozit Malzemeler ve Cesur Tasarımlar, Yakın Geleceğin Uçakları, Teknik Uygulama, 11.

Kazanç,V., 2002, Kompozit Malzemeler ve Mekanik Özellikleri , Isparta.

Kinet A., 2008, Tabakalı Kompozit Malzemelerin Serbest Titreşim Analizi, Şubat, Araştırma Projesi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Kumar, K.V., Safiulla, M. and Ahmed, K., 2012, Influence Of Utm Testing Speed On Ilss And Flexural Strength Of Fiber Epoxy Composites, IJAIR ISSN: 2278-7844pp.

Laachachi, A., Vivet, A., Nouet, G., Doudou, B.B., Poilâne, C., Chen, J., Bo bai, J. and Ayachi, M., 2008. A chemical method to graft carbon nanotubes onto a carbon fiber. Materials Letters, 62:394–397pp.

Liveri, V. T., 2006, Controlled Synthesis of Nanoparticles in Microheterogeneous Systems, Springer Science+Business Media, Inc., New York.

Lonjon, A., Demont, P., Dantras, E. and Lacabanne, C., 2012, Electrical conductivity improvement of aeronautical carbon fiber reinforced polyepoxy composites by insertion of carbon nanotubes, Journal of Non-Crystalline Solids, 358,15:1859–1862pp.

Ma, PC., Siddiqui, N.A., Marom, G. and Kim, J.K., 2010, Dispersion and functionalization of carbon nanotubes for polymer-based nanocomposites, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing 41:1345-1367pp.

Miller, J. C., Serrato, R., RepresasCardenas, J. M. and Kundahl, G., 2004, The Handbook of Nanotechnology, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersy.

NASA (National Aeronautics and Space Administration), Ames Research Center, http://www.ipt.arc.nasa.gov (Erişim tarihi : 20 Eylül 2015).

Neto, A. H., Guinea, F. and Peres, N. M. R., 2006. Drawing conclusions from graphene, Physic World, 19:33pp.

Özel, D. ve Töre, C., 2007, Kompozit Uçak Yüzeyinde Elektrik İletkenliği, Mühendis ve Makina, 48(566).

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Peters, S.T., 1998, Handbook of Composites, Kluwer Academic Publishers.

Qin, W., Vautard F., Drzal, L.T. and Yu, J., 2015, Mechanical and electrical properties of carbon fiber composites with incorporation of graphene nanoplatelets at the fiber–matrix interphase, Composites: Part B, 69:335–34pp.

Rao, C.N. R., Müller, A. and Cheetham, A. K., 2005, The Chemistry of Nanomaterials Volume 1, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KgaA, Weinheim.

Sanjay, K. M., 2001, Composıtes Manufacturing Materials, Product, and Process Engineering, CRC PRESS.

Sawi, I.E., Olivier P.A., Demont, P. and Bougherara, H., 2012, Processing and electrical characterization of a unidirectional CFRP composite filled with double walled carbon nanotubes, Composites Science and Technology, 73:19–26pp.

Sharifzadeh, M., 2006, Nanotechnology Sector Report, Cronus Capital Markets.

Shekar, K.C., Prasad B.A. and Prasad, N.E., 2014, Interlaminar shear strength of multi-walled carbon nanotube and carbon fiber reinforced, epoxy - matrix hybrid composite, Procedia Materials Science, 1336 – 1343pp.

Smallman, R. E. and Bishop, R. J. , 1999, Modern Physical Metallurgy and Materials Engineering, Butterworth Heinemann, Oxford, UK, 350-369pp.

TS EN 1188 ISO 2076., 2002, Tekstil - Yapay Elyaf - Grup İsimleri, Türk Standartları Enstitüsü, ANKARA.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Tuakta, C., 2005, Use of Fiber Reinforced Polymer Composite in Bridge Structures, Master, Massachusetts Instıtute of Technology, Civil and Environmental Engineering, Massachusetts, Boston.

TÜSİAD (Türk Sanayicileri ve İşadamları Derneği) ,2008, 474s.

ER, U., Havacılık Sanayında Kullanılan Plastik Matrisli Kompozit Malzemeler, Hava Harp Okulu - HUTEN.

Willems and van der Willenberg (W & W), 2005, NRM Nanoroadmap Project: Roadmap Report on Nanoparticles.

Yaman, N., Öktem, T. ve Tekin, N.S., 2006, Karbon Liflerinin Üretimi, Ege Üniversitesi, Tekstil Mühendisliği Bölümü, İzmir.

Yu, A., Ramesh, P., Sun, X., Bekyarova, E., Itkis, ME. and Haddon, RC., 2008, Enhanced thermal conductivity in a hybrid graphite nanoplatelet – carbon nanotube filler for epoxy composites. Adv Mater , 20:4740–4pp.

Zum Gahr, K.H., 1987, Microstracture and Wear of Materials,Elsevier, Amsterdam.