



**UÇAK UÇUŞ KONTROL KUMANDA YÜZEYLERİ
VE HAVACILIK NANO TAKVİYELİ HİBRİT
KOMPOZİTLERİN HASAR ANALİZLERİNİN
TERMOGRAFİ YÖNTEMİ İLE
YAPILABİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ**

**2024
DOKTORA TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ**

Cahit BİLGİ

**Tez Danışmanı
Prof. Dr. Bilge DEMİR**

**UÇAK UÇUŞ KONTROL KUMANDA YÜZEYLERİ VE HAVACILIK
NANO TAKVİYELİ HİBRİT KOMPOZİTLERİN HASAR ANALİZLERİNİN
TERMOGRAFİ YÖNTEMİ İLE YAPILABİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ**

Cahit BİLGİ

**Tez Danışmanı
Prof. Dr. Bilge DEMİR**

**T.C.
Karabük Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalında
Doktora Tezi
Olarak Hazırlanmıştır**

**KARABÜK
Mayıs 2024**

Cahit BİLGİ tarafından hazırlanan “UÇAK UÇUŞ KONTROL KUMANDA YÜZEYLERİ VE HAVACILIK NANO TAKVİYELİ HİBRİT KOMPOZİTLERİN HASAR ANALİZLERİNİN TERMOGRAFİ YÖNTEMİ İLE YAPILABİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ” başlıklı bu tezin Doktora Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Bilge DEMİR

.....

Tez Danışmanı, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından Oy Birliği ile Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir. 27/05/2024

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan : Prof. Dr. Yavuz SUN (KBÜ)

.....

Üye : Prof. Dr. Muhammet KAYFECİ (KBÜ)

.....

Üye : Prof. Dr. Bilge DEMİR (KBÜ)

.....

Üye : Prof. Dr. Mustafa ACARER (SÜ)

.....

Üye : Prof. Dr. Hakan GÜRÜN (GÜ)

.....

KBÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Doktora derecesini onamıştır.

Doç. Dr. Zeynep ÖZCAN

.....

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü



“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”

Cahit BİLGİ

ÖZET

Doktora Tezi

UÇAK UÇUŞ KONTROL KUMANDA YÜZEYLERİ VE HAVACILIK NANO TAKVİYELİ HİBRİT KOMPOZİTLERİN HASAR ANALİZLERİNİN TERMOGRAFI YÖNTEMİ İLE YAPILABİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ

Cahit BİLGİ

Karabük Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:

Prof. Dr. Bilge DEMİR

Mayıs 2024, 134 sayfa

Matris içerisinde homojen olarak dağıtılan nano katkıları karbon fiber (CF) takviyeli polimer (CFRP) kompozitlerde birçok avantaj sunmaktadır. Karbon allotropu olan çok cidarlı karbon nanotüpler (MWCNT) ve grafen nanoplateletler (GNP) yüksek elastisite modülü, üstün mekanik özellikler, kimyasal kararlılık, geniş yüzey alanları, elektriksel ve termal iletkenlik gibi birçok benzersiz özelliğe sahiptir. Bu çalışmada iki ayrı grup nano kompozit (kırımsız CF + MWCNT + epoksi ve CF + GNP + epoksi) üretilmiştir. GNP'lerin ve MWCNT'lerin (ağırlıkça % 0,5 – 1 – 1,5 oranlarında üç ayrı miktarda katılmıştır. Nanokompozitler ağırlıkça % katkı miktarına göre isimlendirildi) homojen dağılım sağlayabilmesi için fonksiyoneleştirilmesi ve ardından vakum torbalama ile kalıplama (VBM) yöntemiyle karbon fiber takviyesi ile yüksek kaliteli nanokompozitler geliştirmesi amaçlanmıştır.

Üretilen nanokompozitlerin kimyasal (UV-Vis absorpsiyon spektroskopisi ve Fourier dönüşüm spektroskopisi, FT-IR), mekanik (EN ISO 6892-1 çekme testi, DIN EN 10045 darbe testi ve HV3 sertlik, ASTM D224 D skalası ile shore sertlik testi), termal (diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) ve termogravimetrik analiz (TGA) ile), elektrik iletkenlik (empedans spektroskopisi ve iki prop elektrik iletkenliği testi) karakterizasyonları ve termografi ile yapay hata tespit testleri yapılmıştır. Nano partiküllerin fonksiyonelleştirilmesi ile epoksi içinde dağılımlarının geliştirilmesi; MWCNT'ler (F) için triton X-100 sürfaktanı ve etil alkol (EtOH) ile ultrasonik bir karıştırıcıda ve GNP'ler (F) için ise sodyum dodesil sülfat (SDS) sürfaktanı ve etil alkol (EtOH) ile ultrasonik bir karıştırıcıda yapılmıştır.

UV-Vis absorpsiyon spektroskopisi sonuçları maksimum absorpsiyon 0,5 FMWCNT ve 1,5 FGNP ile sağlandığını göstermiştir. Nanokompozit üretimi; FMWCNT sisteminde 0°/45°/90° ve FGNP sisteminde 0°/90° yönlü örgülü CF kumaş kullanılmıştır, VBM yöntemiyle karakterizasyon için 10 kat CF'den oluşan ve termografi değerlendirmesi için 21 kat CF'den oluşan nanokompozit plakalar üretilmiştir. Bu plakalar, 24 saat bir süre için 25 °C'de ve 1 saat 100 °C'de kürlenmiştir.

Sonuçlar, 20 °C'de 1,5 FMWCNT nanokompozitte 3×10^8 Z' (Ω) değerinde $0,5 \times 10^8$ Z'' (Ω) en iyi dielektrik empedans göstermiştir. 1,5 FGNP nanokompozitte Z'' (Ω) değerlerinde neredeyse 0 dielektrik empedans göstermiştir. Katkısız kompozitte camı geçiş sıcaklığı (Tg) 121 °C iken 0,5 – 1– 1,5 FGNP nanokompozitlerde sırasıyla 123 °C, 127 °C ve 133 °C'dir. Ayrıca katkısız kompozitte erime noktası 366 °C iken 0,5 – 1– 1,5 FGNP nanokompozitlerde ise sırasıyla 368,6 °C, 370 °C ve 370,3 °C olarak ölçülmüştür. Elektrik iletkenliğinde kitlesel akım yoğunluğunda 0,5 FGNP nanokompozitinde % 50 iyileşme ve yüzey akım yoğunluğunda 1 FGNP nanokompozitinde % 18 iyileşme olmuştur. 1 FGNP ve 1,5 FGNP nanokompozitlerinde çekme mukavemeti değerlerinde sırasıyla % 92 (502,5 MPa) ve % 85 (490 MPa) iyileşme ortaya çıkardı. Ayrıca, darbe dayanımlarında, 1 FGNP nanokompozitte % 28 (3,23 J/mm²) ve 1,5 FGNP nanokompozitte ise tekrar azalma (ancak katkısız kompozitten % 12 (2,83 J/mm²) daha iyiydi) meydana gelmiştir. Kırık

yüzeylerin taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile analizi bu sonuçlar ile uyum gösterdi. 1,5 FGNP nanokompozitte fiber-matris bağlarında önemli miktarda ayrılmanın gözlemlendiğini ortaya koymaktadır. Çekme ve darbe dayanımları 1 FGNP nanokompozitte zirve yapıp daha sonra düşerken, FGNP'lerin artışına paralel olarak sertlik değerleri de artmaktadır.

Katkısız kompozitte pals termografi ile 20 °C ortam sıcaklığında 5 kat (~ 1,6 mm) derinlikteki yapay hata tespit edilebilirken 1,5 FGNP nanokompozitinde 20 kat (~ 6,4 mm) derinlikteki yapay hata tespit edilebilmiştir. 46,5 °C' de yapılan Lock in termografi kontrollerinde ise katkısız kompozitte 5 kat (~ 1,6 mm) derinlikteki yapay hata çok açık ve 10 kat (~ 3,2 mm) derinlikteki yapay hata ise çok belirgin olmamakla beraber tespit edilebilmiştir. 0,5 FGNP ve 1 FGNP nanokompozitlerinde 10 kat (~ 3,2 mm) ve 15 kat (~ 4,8 mm) derinlikteki hatalar kolay algılanacak görünürlükteydi. 1,5 FGNP nanokompozitinde 10 kat (~ 3,2 mm) derinlikteki yapay hatalar çok net ve 21 kat (~ 6,4 mm) derinlikteki yapay hatalar kolay algılanacak görünürlükte tespit edilmiştir.

Anahtar Sözcükler : Grafen Nanoplatelet, Karbon Nanotüp, FGNP, FMWCNT, CMC, Sürfaktan, Araldite LY5052, Nanokompozitler, Hibrit Kompozitler, Havacılık CFRP'leri, Termografi.

Bilim Kodu : 93101

ABSTRACT

Ph.D. Thesis

INVESTIGATION OF THE FEASIBILITY OF DAMAGE ANALYSIS OF AIRPLANE FLIGHT CONTROL SURFACES AND AVIATION NANO- REINFORCED HYBRID COMPOSITES USING THERMOGRAPHY METHOD

Cahit BİLGİ

**Karabük University
Institute of Graduate Programs
Department of Mechanical Engineering**

Thesis Advisor:

Prof. Dr. Bilge DEMİR

May 2024, 134 pages

Nano additives distributed homogeneously within the matrix offer many advantages in carbon fiber (CF) reinforced polymer (CFRP) composites. Multiwalled carbon nanotubes (MWCNT) and graphene nanoplatelets (GNP), which are carbon allotropes, have many unique properties such as high modulus of elasticity, superior mechanical properties, chemical stability, large surface areas, electrical and thermal conductivity. This study produced two groups of nanocomposites (non-crimped CF + MWCNT + epoxy and CF + GNP + epoxy). Functionalization of GNPs and MWCNTs (additions in three different amounts at 0.5 - 1 - 1.5 wt%). Nanocomposites were named according to the amount of additive by wt%) to provide homogeneous distribution, and then carbon fiber by vacuum bagging molding (VBM) method. It is aimed at developing high-quality nanocomposites with reinforcement.

The produced nanocomposites were tested chemically (UV-Vis absorption spectroscopy and Fourier transform spectroscopy, FT-IR), mechanical (EN ISO 6892-1 tensile test, DIN EN 10045 impact test and HV3 hardness, shore hardness test with ASTM D224 D scale), thermal (With differential scanning calorimetry (DSC) and thermogravimetric analysis (TGA), electrical conductivity (impedance spectroscopy and two-probe electrical conductivity test) characterizations and artificial fault detection tests were carried out with thermography. Improving their dispersion in epoxy by functionalizing nanoparticles; for MWCNTs (F), triton X-100 surfactant and ethyl alcohol (EtOH) in an ultrasonic mixer, and for GNPs (F), it was made with sodium dodecyl sulfate (SDS) surfactant and ethyl alcohol (EtOH) in an ultrasonic mixer.

UV-Vis absorption spectroscopy results showed that the maximum absorbance was achieved with 0.5 FMWCNT and 1.5 FGNP. Nanocomposite production; 0°/45°/90° directional braided CF fabric was used in the FMWCNT system and 0°/90° directional braided fabric in the FGNP system. Nanocomposite plates consisting of 10 plies of CF for characterization by the VBM method and 21 plies of CF for thermography evaluation were produced. These plates were cured at 25 °C for 24 hours, and 100 °C for 1 hour.

The results showed a best dielectric impedance of $0.5 \times 10^8 Z'' (\Omega)$ at $3 \times 10^8 Z' (\Omega)$ in 1.5 FMWCNT nanocomposite at 20 °C. It showed almost 0 dielectric impedance at $Z'' (\Omega)$ values in 1.5 FGNP nanocomposite. While the glass transition temperature (T_g) in the neat composite is 121 °C, it is 123 °C, 127 °C and 133 °C in 0.5 – 1– 1.5 FGNP nanocomposites, respectively. In addition, while the melting point of the neat composite was 366 °C, it was measured as 368.6 °C, 370 °C and 370.3 °C, respectively, for 0.5 – 1– 1.5 FGNP nanocomposites. There was a 50% improvement in electrical conductivity in the mass current density of 0.5 FGNP nanocomposite and an 18% improvement in surface current density in 1 FGNP nanocomposite. It revealed 92% (502.5 MPa) and 85% (490 MPa) improvement in tensile strength values in 1 FGNP and 1.5 FGNP nanocomposites, respectively. Additionally, a decrease in impact strength occurred by 28% (3.23 J/mm²) in the 1 FGNP nanocomposite and again by 12% (2.83 J/mm²) in the 1.5 FGNP nanocomposite (but it was better than the neat

composite). Analysis of the fractured surfaces by scanning electron microscopy (SEM) was consistent with these results. It reveals a significant amount of separation of fiber-matrix bonds was observed in the 1.5 FGNP nanocomposite. While tensile and impact strengths peak in 1 FGNP nanocomposite and then decrease, hardness values also increase in parallel with the increase in FGNPs.

While artificial defects at a depth of 5 plies (~ 1.6 mm) could be detected by pulse thermography in the neat composite at 20 °C ambient temperature, artificial defects at a depth of 20 plies (~ 6.4 mm) could be detected in the 1.5 FGNP nanocomposite. In the Lock in thermography controls performed at 46.5 °C, the artificial defect at a depth of 5 plies (~ 1.6 mm) in the additive-free composite was very clearly detected, and the artificial error at a depth of 10 plies (~ 3.2 mm) was detected, although it was not very obvious. Defects at depths of 10 plies (~ 3.2 mm) and 15 plies (~ 4.8 mm) in 0.5 FGNP and 1 FGNP nanocomposites were easily detectable. Artificial defects at a depth of 10 plies (~ 3.2 mm) in the 1.5 FGNP nanocomposite were detected very clearly, and artificial defects at a depth of 21 plies (~ 6.4 mm) were detected with easy-to-detect visibility.

Key Word : Graphene Nanoplatelet, Carbon Nanotube, FGNP, FMWCNT, CMC, Surfactant, Araldite LY5052, Nanocomposites, Hybrid Composites, Aviation CFRPs, Thermography.

Science Code : 93101

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının planlanmasında, araştırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen, karakteri ve bilimini her zaman örnek aldığım, bilgi ve tecrübelerinden çok faydalandığım değerli danışmanım Prof. Dr. Bilge DEMİR'e şükranlarımı sunarım. Araştırma süresince verdiği destek ve yardımdan, her zorluğa çözüm sunduğundan, ufkumu genişletecek ve çalışmalarımın kalitesini artıracak birçok fırsat yarattığı için kendisine sonsuza kadar minnettarım.

Sabırla çalışmalarımın tamamlanmasını bekleyen ve bazen bana eşlik eden oğlum Demirhan BİLGİ ve eşim Derya BİLGİ'ye en kalbi duygularıyla teşekkür ederim. Doğduğum andan itibaren her türlü fedakarlığı gösteren en büyük destekçilerim annem, babam ve sevgili ailemin her bir bireyine çok teşekkür ederim. Tezimi onlara ithaf ediyorum.

Tezimin tüm süreçlerini yakından takip eden ve geri bildirimleriyle bana yol gösteren tez izleme komitesindeki Prof. Dr. Yavuz SUN'a ve Prof. Dr. Muhammet KAYFECİ'ye teşekkür ederim.

Tez çalışmam sırasında desteklerinden ve yardımlarından dolayı BAYKAR Teknoloji'ye ve çalışanları Neslihan TOPALÖMER ve Sena BAYRAKTAR'a, THY TEKNİK A.Ş. Tahribatsız Muayene Atölye Müdürü Ender KAVRAR'a ve çalışanları Tarık GÜLER ve Hakan AYKENT'e teşekkür ederim.

Ayrıca bu tezin yürütülmesinde sağladıkları proje olanaklarından dolayı Karabük Üniversitesi Bilimsel Araştırma Koordinatörlüğü'ne (KBÜBAP-DR21-080) ve Türk Havacılık Uzay Sanayii A.Ş.'ne (TUSAŞ) (2022-TAI-BAP) teşekkür ederim. Laboratuvar imkanlarından dolayı çalıştığım İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa'ya teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vii
TEŞEKKÜR.....	x
İÇİNDEKİLER	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xv
ÇİZELGELER DİZİNİ	xviii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xix
BÖLÜM 1	1
GİRİŞ	1
1.1. LİTERATÜR TARAMASI.....	7
BÖLÜM 2	14
UÇAK UÇUŞ KONTROL KUMANDA YÜZEYLERİ	14
2.1. ANA UÇUŞ KONTROL KUMANDA YÜZEYLERİ	15
2.1.1. Kanatçık.....	15
2.1.2. İrtifa Dümeni	15
2.1.3. İstikamet Dümeni.....	16
2.2. YARDIMCI UÇUŞ KUMANDA KONTROL YÜZEYLERİ.....	16
2.2.1. Slat	16
2.2.2. Flap	17
2.2.3. Hız Kesiciler	17
2.2.4. Fletner	18
2.3. KOMPOZİT MALZEMELER.....	18
2.3.1. Matris.....	21
2.3.2. Takviye	21
2.3.3. Matris Sistemine Göre Kompozitler	22

	<u>Sayfa</u>
2.3.3.1. Seramik Matrisli Kompozitler	22
2.3.3.2. Metal Matrisli Kompozitler	22
2.3.3.3. Polimer Matrisli Kompozitler	23
2.3.4. Takviye Elemanına Göre Kompozitler	24
2.3.4.1. Cam Fiber Takviyeli Kompozitler	25
2.3.4.2. Aramid Fiber Takviyeli Kompozitler	25
2.3.4.3. Karbon Fiber Takviyeli Kompozitler (CFRP)	26
2.4. KOMPOZİT ÜRETİM YÖNTEMLERİ	28
2.4.1. Elle Yatırma Yöntemi.....	28
2.4.2. Püskürtme Yöntemi	29
2.4.3. Elyaf (Filament) Sarma Yöntemi.....	30
2.4.4. Reçine Transfer Kalıplama Yöntemi	30
2.4.5. Vakum İnfüzyon Yöntemi	31
2.4.6. Vakum Torbolama Yöntemi (VBM)	32
2.5. HAVACILIKTA KOMPOZİT MALZEMELER	33
2.6. HAVACILIKTA NANOKOMPOZİT MALZEMELER.....	35
2.6.1. Elyaf Takviyeli Polimer (FRP) Nanokompozitler	37
2.6.2. Sürfaktan.....	38
2.6.3. Grafen	40
2.6.4. Grafen Oksit.....	41
2.6.5. Grafen Nanoplatelet (GNP)	41
2.6.6. Karbon Nanotüp.....	42
 BÖLÜM 3	 44
MALZEMELERİN KARAKTERİZASYONU	44
3.1. KİMYASAL KARAKTERİZASYON.....	44
3.1.1. Ultraviyole ve Görünür (UV-Vis) Spektroskopi	44
3.1.2. Fourier Dönüşüm (FT-IR) Spektroskopi	44
3.2. TERMAL KARAKTERİZASYON	45
3.2.1. Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC)	45
3.2.2. Termogravimetrik Analiz (TGA)	45
3.3. ELEKTRİKSEL KARAKTERİZASYON	46

	<u>Sayfa</u>
3.3.1. Empedans Spektroskopisi	46
3.3.2. İki Prop Elektrik İletkenlik Testi	46
3.4. MORFOLOJİK KARAKTERİZASYON	47
3.4.1. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM).....	47
3.5. MEKANİK KARAKTERİZASYON.....	47
3.5.1. Çekme Testi	47
3.5.2. Darbe Testi.....	48
3.5.3. Sertlik Testi.....	48
3.6. HASARSIZ KONTROL YÖNTEMLERİ İLE DEĞERLENDİRME	48
3.6.1. Floresan Penetrant Yöntemi (FPI)	49
3.6.2. Termografi Yöntemi	50
3.6.2.1. Lock in Termografi (LT)	52
3.6.2.1. Pals Termografi (PT)	52
BÖLÜM 4	53
DENEYSEL ÇALIŞMALAR	53
4.1. NANOKOMPOZİT MALZEME ÜRETİM MATERYALLERİ.....	53
4.1.1. Grafen Nanoplatelet (GNP)	53
4.1.2. Sodyum Dodesil Sülfat (SDS)	54
4.1.3. Çok Cidarlı Karbon Nanotüp (MWCNT).....	54
4.1.4. Polietilen Glikol Tert-Oktıl Fenil Eter (Triton X-100).....	54
4.1.5. Karbon Fiber Kumaş Takviyesi.....	54
4.1.6. Epoksi Matrisi.....	55
4.2. DENEY TASARIMI VE NANOKOMPOZİT MALZEME ÜRETİM METODU	55
4.2.1. GNP'lerin Fonksiyonlaştırılması ve Epoksi Çözeltisinin Hazırlanması	55
4.2.2. MWCNT'lerin Fonksiyonlaştırılması ve Epoksi Çözeltisinin Hazırlanması	57
4.2.3. Nanokompozit Plakaların Üretimi	59
BÖLÜM 5	61
DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	61

	<u>Sayfa</u>
5.1. FMWCNT SONUÇLARI.....	61
5.1.1. UV-Vis Spektroskopi Sonuçları	61
5.1.2. FT-IR Spektroskopi Sonuçları.....	62
5.1.3. DSC Spektroskopi Sonuçları	64
5.1.4. Empedans Spektroskopisi Sonuçları	66
5.1.5. Elektrik İletkenliği Sonuçları.....	67
5.2. FGNP SONUÇLARI.....	70
5.2.1. UV-Vis Spektroskopi Sonuçları	70
5.2.2. FT-IR Spektroskopi Sonuçları.....	71
5.2.3. DSC Spektroskopi Sonuçları	73
5.2.4. TGA Spektroskopi Sonuçları.....	76
5.2.5. Empedans Spektroskopisi Sonuçları	78
5.2.6. İki Prop Elektrik İletkenliği Sonuçları.....	79
5.2.7. Çekme Testi Sonuçları.....	81
5.2.8. Darbe Testi Sonuçları	84
5.2.9. Sertlik Testi Sonuçları	86
5.2.10. Kırılma Modu ve Morfoloji (SEM)	89
5.2.11. Ağırlık Düşürme Darbe Testi Sonuçları	93
5.2.12. FPI Yöntemi ile Hasar Kontrolü.....	97
5.2.13. Termografik Muayene ile Yapay Hata Kontrolü.....	99
 BÖLÜM 6	 102
SONUÇLAR	102
KAYNAKLAR	110
ÖZGEÇMİŞ	134

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 1.1. Sürfaktan yapısı (a), misel oluşumu (b) ve sürfaktanların sınıflandırılması (c)	4
Şekil 1.2. (a) GNP' nin kimyasal yapısı ve (b) arayüzeyi güçlendirmek için SDS'nin epoksi ve karbon fiber ile oluşturduğu bağlar	5
Şekil 2.1. Uçuş eksenleri ve uçak ana uçuş kontrol kumanda yüzeyleri.....	14
Şekil 2.2. Yardımcı uçak uçuş kontrol kumanda yüzeyleri.	17
Şekil 2.3. Uçak uçuş kumanda yüzeyleri fletnerleri.	18
Şekil 2.4. Kompozitlerin bileşimi	19
Şekil 2.5. Çeşitli takviye fiberleri için çekme gerilmesi gerinim diyagramları	20
Şekil 2.6. Kompozit malzemelerin gelişimini gösteren mühendislik malzemesi sınıfları arasındaki ilişki	20
Şekil 2.7. Elyaf Dokuma açısı atkı ipliği, çözgü ipliği.	27
Şekil 2.8. Düz dokuma ve dişi dokuma CF.	27
Şekil 2.9. Elle yatırma yöntemi ile kompozit üretimi	29
Şekil 2.10. Püskürtme yöntemi ile kompozit üretimi.....	29
Şekil 2.11. Filament sarma yöntemi ile kompozit üretimi	30
Şekil 2.12. RTM yöntemi ile kompozit üretimi	31
Şekil 2.13. VİP ile kompozit üretimi	32
Şekil 2.14. VBM yöntemi ile kompozit üretimi	33
Şekil 2.15. B 787 uçak gövdesinde kullanılan malzemeler.	34
Şekil 2.16. A 380 uçağında kullanılan CFRP malzemeler.....	35
Şekil 2.17. Uçaklarda nano katkı kullanılması hedeflenen kısımlar.....	37
Şekil 2.18. Fiber-matris fazları ve arayüz (a), üçüncü bileşen arafaz (b).	38
Şekil 2.19. Karbon atomu (a), karbon atomu yörüngesi (b), karbon atomu bağları (c).	40
Şekil 2.20. Karbonun allotropları.....	40
Şekil 2.21. Grafit (a); grafit şematiği (b); grafen şematiği (c).	41
Şekil 2.22. Grafen bazlı nano katkılar.....	43
Şekil 3.1. FPI yöntemi ile yüzey hatalarının kontrolü.	50
Şekil 3.2. Yüzey altı hataların termografi yöntemi ile kontrolü	51

Şekil 4.1. GNP'nin transmisyon elektron mikroskobu (TEM) görüntülerini göstermektedir.	53
Şekil 4.2. GNP'lerin SDS ile fonksiyonlaştırılması.....	56
Şekil 4.3. Homojen FGNP-epoksi çözeltisinin oluşturulması (a), VBM yöntemiyle FGNP katkılı CFRP nanokompozit üretimi (b).	57
Şekil 4.4. Homojen FMWCNT-epoksi çözeltisinin oluşturulması (a), VBM yöntemiyle FMWCNT katkılı CFRP nanokompozit üretimi (b).	58
Şekil 4.5. Nanokompozitlerin üretim aşamaları.....	60
Şekil 4.6. Termografi metodunun uygulanabilirliğinin kontrolü için yapay hata içeren FGNP katkılı CFRP'lerin üretilmesi.	60
Şekil 5.1. MWCNT ilaveli epoksi kompozitlerin UV-görünür absorpsiyon spektrumları.	62
Şekil 5.2. FMWCNT katkılı nanokompozitlerin FT-IR sonuçları.....	64
Şekil 5.3. FMWCNT katkılı nanokompozitlerin DSC sonuçları.	65
Şekil 5.4. FMWCNT katkılı nanokompozitlerin empedans (Z'' - Z') spektroskopisi ölçümleri 20°C (a) ve 120°C (b).	67
Şekil 5.5. FMWCNT katkılı nanokompozitlerin Elektriksel iletkenlik (S/cm^{-1}), 20°C (a) ve 120°C (b).	69
Şekil 5.6. SDS'li GNP'lerin (a), FGNP ilaveli epoksinin (b), SDS sürfaktanının (c) ve FGNP Konsantrasyonunun (d) UV-Vis absorbans spektrumları.	71
Şekil 5.7. GNP, SDS ve epoksi arasındaki bağlar ve kimyasal yapıları.	72
Şekil 5.8. FGNP katkılı nanokompozitlerin FT-IR spektrumları.....	73
Şekil 5.9. FGNP katkılı nanokompozitlerin DSC eğrileri (a), erime tepe sıcaklıkları ve erime entalpileri (b).	74
Şekil 5.10. FGNP katkısı ile oluşturulan termal köprülerin ve termal yolların şematik ve SEM görüntüleri.	75
Şekil 5.11. Katkısız kompozit ve FGNP katkılı nanokompozitlerin ağırlık kaybı TGA eğrisi.	76
Şekil 5.12. Katkısız kompozit ve FGNP katkılı nanokompozitlerin DTG eğrisi.	77
Şekil 5.13. FGNP katkılı nanokompozitlerin empedans (Z'' - Z') spektroskopisi ölçümleri 20°C (a) ve 120°C (b).	79
Şekil 5.14. Nanokompozit numunelerin I-V yöntemiyle elektriksel karakterizasyonu, yüzey akım yoğunluğu (a), bulk akım yoğunluğu (b), yüzey direnci (c) ve bulk direnci (d).	80
Şekil 5.15. FGNP katkılı CFRP nanokompozitlerinin çekme mukavemeti (a) ve pik yük, pik gerilme ve kırılma uzaması grafiği (b).	82
Şekil 5.16. FGNP katkılı CFRP nanokompozitlerinin darbe dayanımı.	86
Şekil 5.17. FGNP katkılı CFRP nanokompozitlerinin sertlik değeri.	88

Şekil 5.18. FGNP katkılı nanokompozitlerin sertliğinin, darbesinin ve gerilme mukavemetinin karşılaştırmalı değerlendirmesi.....	89
Şekil 5.19. Darbe kırılma yüzeyinin SEM görüntüleri: (a-c) katkısız kompozitler, (d-f) 0.5 FGNP nanokompozitler, (g-i) 1 FGNP nanokompozitler, (j-l) 1.5 FGNP nanokompozitler.....	91
Şekil 5.20. Çekme kırılma yüzeyinin SEM görüntüleri, (a-c) katkısız kompozitler, (d-f) 1,5 FGNP nanokompozitler.	92
Şekil 5.21. Kırılma yüzeyinin SEM görüntüleri: (a-c) katkısız kompozitler, (d-f) 0,5 FGNP nanokompozitleri, (g-i) 1 FGNP nanokompozitleri, (j-l) 1,5 FGNP nanokompozitleri.	93
Şekil 5.22. FGNP katkılı nanokompozitlerin ağırlık düşürme darbe testi sonrası görüntüleri.	94
Şekil 5.23. FGNP katkılı nanokompozitlerin ağırlık düşürme darbe testi sonuçları, 34 J ile oluşan hasarlı alan sonuçları (a) ve 62 J ile oluşan hasarlı alan sonuçları (b).	95
Şekil 5.24. FGNP katkılı nanokompozitlerde ağırlık düşürme darbe testi sonrası nano katkı- derinlik ilişkisi.....	96
Şekil 5.25. FGNP Katkılı nanokompozitlerde FPI yöntemi ile hasar ve çatlak kontrolü.	98
Şekil 5.26. Yapay hata bulunduruna FGNP katkılı nanokompozitlerin termografi muayenesi.....	100

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 1.1. GNP veya CNT nano katkısının epoksi matrisli kompozitlere katkılandırması üzerine yapılan literatür taraması.	10
Çizelge 1.2. GNP veya CNT nano katkısının epoksi matrisli kompozitlere katkılanarak termografi yönteminin uygulanabilirliği üzerine yapılan literatür taraması	12
Çizelge 2.1. Reçine çeşitleri ve özellikleri	24
Çizelge 2.2. Karbon allotroplarının özellikleri.	43
Çizelge 4.1. Epoksinin, sertleştiricinin ve karışımın fiziksel özellikleri.....	55
Çizelge 4.2. Nanokompozitlerin isimlendirilmesi ve içerikleri.	59
Çizelge 5.1. Katkısız kompozit ve FGNP katkılı nanokompozitlerin termal ayrışma sıcaklığı.	78
Çizelge 5.2. Katkısız kompozit ve FGNP katkılı CFRP nanokompozitlerinin çekme özellikleri.	84

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

μm	: mikrometre
a.u.	: absorbans
C=O	: karbonil
C-C	: karbon atomları
GPa	: gigapaskal
h	: hour
HV3	: vickers sertlik skalası
kN	: kilonewton
m	: metre
mm	: milimetre
MPa	: megapaskal
nm	: nanometre
NO _x	: azot oksit
OH	: hidroksil
ppm	: parça/milyon
SO ₄ ⁻²	: sülfat
T _g	: camsı geçiş sıcaklığı
ΔH	: entalpi
π -n	: C=O bağları
π - π	: van der Walls bağları (C=C)
Ω	: ohm

KISALTMALAR

ASTM : American Society for Testing and Materials (Amerika Deneme ve Malzeme Topluluğu)

CFRP : Carbon Fiber Reinforced Polymer (Karbon Fiber Takviyeli Polimer)

CMC : Critical Micelle Concentration (Kritik Misel Konsantrasyonu)

CTAB : Cetyltrimethylammonium Bromide (Setil-Trimetil-Amonyum Bromit)

DIN : Deutch Industrie Normen (Alman Endüstri Normları)

DTG : Derivative Thermo Gravimetric (1. TGA Türevi)

EN : European Norm (Avrupa Normu)

FGNP : Functionalized Graphene Nanoplatelet (Fonksiyonlaştırılmış Grafen Nanoplatelet)

FPI : Fluorescent Penetrant Inspection (Floresan Penetrant ile Kontrol)

LDS : Lauryl Dodecyl Sulafet (Lauril Dodesil Sülfat)

LT : Lock in Thermography (Lock in Termografi)

PT : Pulse Thermography (Pals Termografi)

SDBS : Sodium Dodecyl Benzene Sulfonate (Sodyum Dodesil Benzen Sülfonat)

SDS : Sodium Dodecyl Sulfate (Sodyum Dodesil Sülfat)

TS : Türk Standardı

TTAB : Tetradecyltrimethylammonium Bromide (Tetradesil Trimetil Amonyum Bromür)

VBM : Vacuum Bagging Mold (Vakum Torbalama ile Kalıplama)

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Maksimum mukavemet-ağırlık, sertlik-ağırlık oranları ve daha az bakım gerektiren çok işlevli malzemeler olan karbon fiber takviyeli polimer (CFRP) matrili kompozitler, havacılık ve uzay yapıları gibi geniş bir uygulama yelpazesinde geleneksel metalik malzemelerin yerini almaktadır [1,2]. Karbon fiberler (CF'ler), esas olarak üstün mukavemetleri, düşük yoğunlukları ve düşük maliyetleri nedeniyle havacılık endüstrisindeki en popüler seçeneklerden biridir [3,4]. Havacılıkta kullanılan CFRP matris kompozitlerinin üretiminde yaygın olarak kullanılan matris malzemesi olan epoksi reçineler, mükemmel termo-mekanik özelliklerinden dolayı en iyi seçenektir [5-7].

Bununla birlikte eksen dışı mukavemet, çatlak direnci ve delaminasyon açısından sınırlamalar ve epoksi reçinelerdeki çapraz bağlanma yoğunluğu nedeniyle düşük kırılma tokluğu, CFRP kompozitlerin ana dezavantajlarıdır [8-11]. Yüksek elektriksel iletkenlik, mukavemet ve tokluk gerektiren uygulamalar için uygun değildirler [12]. Ayrıca fiber ile matris arasındaki zayıf ara yüzey bağları nedeniyle [13] darbe hasarı durumunda fiber matrisinin ayrılması kolaylıkla meydana gelir.

Matris içerisinde homojen olarak dağılmış nano katkı maddeleri, matris ile fiber arasındaki nanoboşlukları doldurarak tam yapışma sağlar ve daha güçlü arayüzey bağları oluşturur [14-16]. Her nano katkı maddesi CFRP kompozitlerinin özelliklerini farklı şekilde geliştirir [17-19]. Titanyum karbür nano katkısı, epoksi matrisli kompozitlerde alev geciktirici ve mekanik özellikleri iyileştirir [20]. Buna karşılık, katkı maddeleri olarak poliamid ve silikon dioksit cam tozu, tekrarlanan yüksek gerilimli darbelere karşı olağanüstü direnç gösterir [21]. Bor nitrür nano tabakaları elektronik cihazlar için mükemmel termal stabilite için kullanılır [22] ve sinterlenmiş

gümüş nanopartikülleri metal matrisli kompozitlerde elastoplastik özellikleri ve dayanıklılığı geliştirmek için kullanılır [23]. Geçtiğimiz yıllarda karbon nanotüpler (CNT'ler) [24–26] ve karbon nanofiberler (CNF'ler) [27,28] gibi nanomateriyalleri dahil ederek CFRP'lerin özelliklerini geliştirmek için çok çaba sarf edilmiştir. Homojen dağılım sağlamış CNT'lerin, bitişik karbon fiberler arasında etkili bir termal köprü görevi görerek termal iletkenliği artırır [29].

2004 yılında keşfedilen [30] grafen nano katkı maddeleri, yüksek yüzey-hacim oranına, yüksek en boy oranına, düşük elektrik direncine, yüksek termal iletkenliğe ve yüksek mukavemet ve modüle sahiptir. Bu özellikler grafeni diğer nano katkı maddeleri ile karşılaştırıldığında kompozitler için üstün bir katkı maddesi haline getirmektedir. Grafen, uygun şekilde dahil edildiğinde matrisin fiziksel ve kimyasal özelliklerini önemli ölçüde geliştirebilir [31–33]. Grafen Oksit (GO), düşük basınç altında düşük dönüş hızlarında epoksi matrisli kompozitlerdeki sürtünme katsayısını azaltır [34]. Epoksiye hacimce % 0,46 saf grafen (PG) eklemek, mekanik özellikleri % 10'dan fazla geliştirebilir [35]. Matrise grafen nanoplateletlerin (GNP'ler) veya çok cidarlı karbon nanotüp (MWCNT) eklenmesiyle güçlendirilen kompozitler üstün mekanik, elektriksel ve termal özelliklere sahiptir. Bu nedenle fonksiyonel ve yapısal malzemeler için potansiyel nano katkılardır [36–39].

CFRP kompozitlerin mekanik özelliklerini iyileştirmek için epoksi matrisine GNP veya MWCNT eklenmesi son yıllarda etkili bir yöntem olarak araştırılmaktadır [40,41]. GNP'ler genellikle 5-10 nm kalınlığındaki iki boyutlu bir kafes halinde düzenlenmiş tek bir sp^2 karbon atomu katmanı [42] kısa grafen tabakalarından oluşan benzersiz nanopartiküllerdir [43]. MWCNT'ler ise 100 nanometreden daha az çapları ve 1-2 nm inceliğinde nanopartiküllerdir [44].

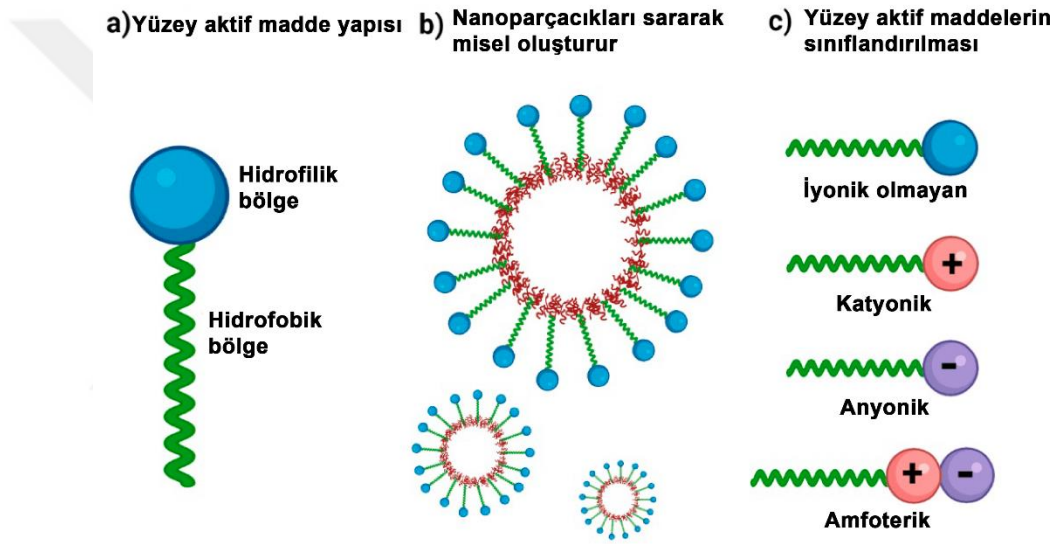
GNP veya MWCNT ilavesi ile nanokompozitlerin üstün özelliklerini elde etmek için nano katkının epoksi içerisinde homojen olarak dağılması gerekir. Aglomerasyon lokal gerilimlere [45] neden olur ve nanokompozitin mukavemetini önemli ölçüde azaltır [46]. Topaklaşmayı önlemek ve GNP'yi veya MWCNT'yi homojen bir şekilde dağıtmak için sonikasyon kullanımı etkili bir yöntem olmuştur [47–49].

Öte yandan GNP'nin ve MWCNT' nin fonksiyonlaştırılması ile bu nano katkıların yüzeylerinde hidroksil, epoksit, karbonil ve karboksilik asit gibi fonksiyonel gruplar oluşturulduğundan, nanopartiküller için bağlantı noktaları sağlar, kompozitleri güçlendirir, GNP'nin ve MWCNT'nin epoksi içinde homojen dağılmasını sağladığından çok önemlidir [12,50,51].

Sümfaktanlar çözeltilerde dinamik yüzey gerilimini sağlayarak homojen bir dağılım elde edilmesine yardımcı olurlar [52]. Hidrofobik (suyu sevmeyen) bir baş ve hidrofilik (suyu seven) bir kuyruktan oluşan amfipatik maddelerdir. Molekül başına birkaç bağlayıcı gruba sahip monomerik surfaktanlar ve molekül başına birçok bağlayıcı gruba sahip polimerik surfaktanlar şeklinde sınıflandırılır. Ayrıca hidrofobik başın taşıdığı elektrik yüküne göre pozitif yük taşıyanlar katyonik, negatif yük taşıyanlar iyonik, hem pozitif hem de negatif yük taşıyanlar amfoterik ve hiç yük taşımayanlar iyonik olmayan olarak sınıflandırılır. Şekil 1.1'de sümfaktan yapısı, misel oluşumu ve sümfaktanların sınıflandırılması verilmiştir. İyonik surfaktanlar düşük üretim maliyeti, iyi dağılım, yüksek ısılabirlik ve dinamik yüzey gerilimi sağlayabilen en iyi surfaktanlardır [53–55].

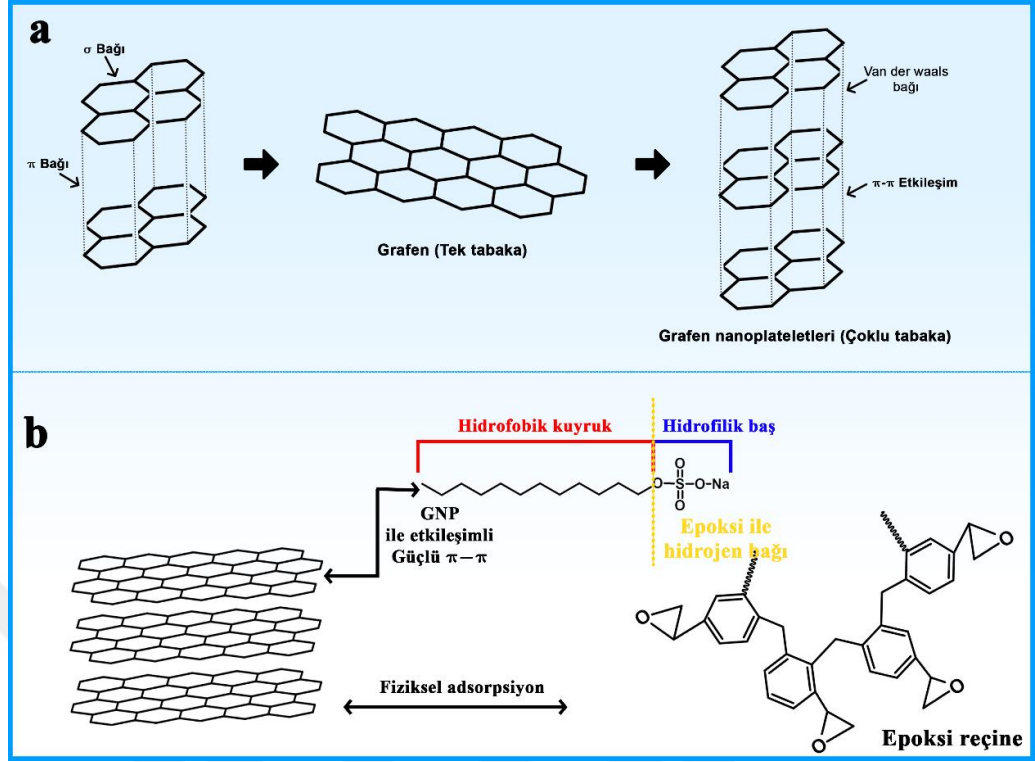
Karbon allotropu olan GNP veya MWCNT etil alkol ile karıştırıldığında bir süre sonra dibe çökerler ve etil alkol üstte kalır. Birbiri içerisinde karışmayan karbon allotropları ve etil alkol (EtOH) surfaktanların yardımıyla birleşerek emülsiyon oluşur. Sümfaktanlar emülsiyonları iki mekanizma ile stabilize ederler. Birincisi GNP/MWCNT ve etil alkol arasındaki arayüzey gerilimini azaltırlar. GNP/MWCNT ve etil alkol karışıp GNP/MWCNT öbekleri oluştuğunda emülsiyonun arayüzey alanında kayda değer bir artış olur. Sümfaktan katkısıyla, arayüzey alanın oluşturacağı serbest enerjide önemli bir artış olmaz. İkincisi ise surfaktanlar, GNP/MWCNT öbekleri ile ana faz arasında hacimsel, elektriksel ve mekanik bir bariyer oluşturarak bu öbeklerin birleşmesini azaltacaktır. Sümfaktanlar GNP/MWCNT nano katkısının etrafını sararak veya etrafında bir misel oluşturarak yeniden yığılmayı önler [53,54]. GNP'lerin karbon atomları (C-C) arasındaki zayıf van der Waals bağlarını kırmak [56] ve sümfaktanı kritik misel konsantrasyonuna (CMC) göre eklemek çok önemlidir [57]. Anyonik, katyonik ve iyonik olmayan surfaktanlar arasında GNP yüzeyinin 0,011 mg/ml gibi çok düşük Sodyum Dodesil Sülfat (SDS) konsantrasyonunda bile stabilize

edilebildiğini ve SDS konsantrasyonu CMC'ye kadar arttırıldığında çözeltiyi dağıtma yeteneği de artmaktadır [58]. Kısa kuyruğu ve küçük baş yapısı nedeniyle SDS, sürfaktan molekül grupları arasındaki itme etkileşimlerini azaltarak diğer sürfaktanlara göre daha iyi bir dağılım sağlar [59,60]. Ayrıca SDS miktarının CMC'ye kadar arttırılmasıyla agregasyon önlenmektedir [61,62]. Dinamik yüzey geriliminin [63,64] zamanla azalmaması ve kendi kendine topaklanmanın meydana gelmemesi için CMC'ye [65,66] göre SDS sürfaktan maddesinin eklenmesi gerekir. SDS konsantrasyonu CMC'den düşükse π - π agregasyonuna, daha yüksekse grafenin oksitlenmesine neden olur [64].



Şekil 1.1. Sürfaktan yapısı (a), misel oluşumu (b) ve sürfaktanların sınıflandırılması (c) [67].

Şekil 1.2 (a) GNP'nin kimyasal yapısını gösterirken, Şekil 1.2 (b) SDS'nin arayüzü güçlendirmek için epoksi ve karbon fiber ile oluşturduğu bağları göstermektedir. Ayrıca SDS ile fonksiyonlaştırma GNP'lerde oksidasyon ve kusur oluşturmada dağıtılabilir, böylece yapının bütünlüğünü ve elektriksel özellikleri korunur [68].



Şekil 1.2. (a) GNP' nin kimyasal yapısı ve (b) arayüzeyi güçlendirmek için SDS'nin epoksi ve karbon fiber ile oluşturduğu bağlar.

MWCNT ise amin gruplar ile fonksiyonlaştırıldığında sürfaktanın polar amin grupları ile, hidroksil ile fonksiyonlaştırıldığında sürfaktanın hidroksil grupları arasında oluşan karşılıklı hidrojen bağları MWCNT moleküllerindeki zayıf arayüzey bağlarını güçlendirir [69]. Hidrojen bağlarının bu sterik etkisi, MWCNT molekülleri arasındaki van der Waals bağları bir araya gelme eğilimini engeller [70]. Çözeltiye katılan MWCNT nano katkı miktarının artırılması sonikasyon enerjisini de arttırmayı gerektirir oysa sürfaktan miktarını CMC' ye kadar arttırarak az sonikasyon enerjisi ile çözelti oluşturulur [71][72]. Maksimum absorbans, sonikasyonun başlangıcında bir artış gösterir ve sürfaktan miktarına bağlı olarak farklı bir büyüklüğe sahip bir platoya ulaşır [73]. MWCNT nano katkısının yüzeyini fonksiyonlaştırmak için sodyum dodesil sülfat (SDS) tween 20, tween 80 ve triton X-100 sürfaktanlarının emülsiyon özelliklerine bakıldığında triton X-100 en başarılı emülsiyon performansı sağlamaktadır [74]. Ayrıca triton X-100 MWCNT'ün epoksi içinde ıslatılabilirliği arttırmaktadır [75].

Nano katkılı CFRP üretmek için vakum infüzyon reçine transfer kalıplama [76], elle yatırma [77], sıcak pres [5] ve vakum torbalı kalıplama (VBM) [78] gibi birçok yöntem vardır. Ancak 3K dimi tip dokuma CF kumaş, Araldite LY5052 epoksi sistemleri ve FGNP veya FMWCNT üzerine araştırma bulunmamaktadır. VBM yöntemi CF kumaşlar arasındaki hava boşluklarını ortadan kaldırır dolayısıyla matris çatlaklarını önler [13] ayrıca vakumlu battaniye fazla epoksiyi emerek incelik, dayanıklılık [78], tam yapışma ve hafiflik sağlar. Açık literatüre göre FGNP/FMWCNT katkılı CFRP kompozitlerin özelliklerinin iyileştirilmesinde vakumun etkisi görülmektedir. Vakum infüzyon yönteminde nano katkı maddelerinin infüzyon hortumlarına yapışarak göreceli tıkanmaya neden olduğunu, nano katkı maddelerini filtreleyerek daha az katkı maddesi içeren kompozit üretimine neden olur.

GNP' nin polimer matrisli kompozit yapılar üzerindeki etkisi, farklı parametrik ve bileşen çalışmaları ile araştırmacıların ilgisini çekmeye devam etmektedir [79,80] [5]. Literatürde GNP katkılı [79] CFRP nanokompozitlerinin, GNP katkılı epoksi [5] nanokompozitlerin, kovalent fonksiyonelleştirilmiş GNP katkılı CFRP [80] veya MWCNT katkılı CFRP [44] nanokompozitlerinin mekanik, termal ve elektriksel özellikleri GNP katkısı ile iyileşmiştir.

Açık literatür incelendiğinde, CFRP kompozitlerin mekanik özelliklerini iyileştirmek için saf grafen (PG) [81], GO [81] ve GNP nano katkı maddeleri ve Araldite LY5052 [82–85] ile ayrı ayrı önemli araştırmalar yapılmış olmasına rağmen bu çalışmada kullanılan Araldite LY5052 havacılık epoksi matrisine FGNP'in/FMWCNT'ün katkılanması ile ilgili herhangi bir araştırma bulunmamaktadır. Aynı zamanda FGNP/FMWCNT katkılı CFRP nanokompozitinin VBM metodu ile üretilmesi literatürdeki temel eksikliklerden biridir. Sürekli olarak basma-gerilme kuvvetlerine, kuş çarpmalarına ve dolu hasarına maruz kalan havacılık CFRP'lerinde hızlı çatlak başlangıcı ve deformasyon meydana gelir. Havacılık CFRP'lerinin bu sorunları, literatürdeki temel eksikliklerin önemini ortaya koymaktadır. Havacılık CFRP'lerindeki bu yetersizlikler ve aynı zamanda nano parçacık katkılı CFRP kompozitlerde termografi yönteminin uygulanabilirliği üzerine hiç çalışma bulunmaması matrise daha yüksek miktarlarda homojen FGNP/FMWCNT eklemenin, havacılıkta kullanıma aday daha dayanıklı ve daha iletken FGNP/FMWCNT katkılı

CFRP nanokompozitleri üretebileceği ve termografik muayene yapılabileceği hipotezini oluşturmuştur.

Açık literatürde, GNP'yi ağırlıkça % 1'den daha az [86–88], % 0,25 [89], % 0,3 [90] % 0,4 [91] gibi miktarlarda işlevselleştirmek için farklı sürfaktanlar ve sulu çözeltiler [52,61,62,92] kullanılmıştır ve maksimum % 25 mekanik iyileşme gözlemlenmiştir. Bu çalışmada, CMC'ye göre SDS eklemenin ve solvent olarak etil alkol (EtoH) kullanmanın yüzey gerilimi stabilitesini sağlayacağını ve topaklanmayı önleyeceğini varsayılmıştır. Homojen FGNP/FMWCNT katkısı ağırlıkça % 1,5'a kadar eklenebilmesi öngörülmüştür.

FGNP/FMWCNT katkılı nanokompozit üretiminde VBM yönteminin seçilmesinin matris ile fiber arasında tam yapışmayı sağlayacağı, matristeki hava boşluklarını ve çatlakları önleyeceği dolayısıyla homojen dağılmış arafazın katkısı ile güçlü arayüz oluşması öngörülmüştür. FGNP/FMWCNT nano katkı maddelerinin ayrıca matris ile fiber arayüzü arasındaki boşlukları doldurarak, fiberler arasında köprüler kurarak yük, ısı ve elektrik aktarımını kolaylaştırarak ve mikro çatlak oluşumunu yavaşlatarak daha güçlü bir arayüz oluşacağı varsayılmıştır. Üretilcek FGNP katkılı nanokompozitlerin mekanik darbe ve çekme mukavemetinde en az % 25 oranında iyileşme, termal ve elektriksel özelliklerinde en az % 10 iyileşme oluşacağı varsayılmıştır.

Dolayısıyla bu çalışmanın amacı (1) EtOH ve SDS kullanarak FGNP/FMWCNT hazırlamak, (2) havacılık endüstrisinde kullanılabilecek FGNP/FMWCNT katkılı CFRP nanokompozitleri üretmek, (3) farklı miktarlardaki FGNP/FMWCNT katkılarının CFRP nanokompozitleri üzerindeki etkisini belirlemek (4) termografi yönteminin farklı miktarlardaki FGNP/FMWCNT katkıları ile katkılanmış CFRP nanokompozitlerindeki uygulanabilirliğinin tespit edilmesidir.

1.1. LİTERATÜR TARAMASI

Smith vd. grafen yüzeyini anyonik (SDS, LDS, SDBS), katyonik (CTAB, TTAB, TDOC, DOC, SC) ve iyonik olmayan (Tween 20, Tween 80, Triton X, IGEPAL) 12 farklı surfaktanla fonksiyonlaştırdı. Grafenin en düşük SDS konsantrasyonu olan

0,011 mg/ml'de bile stabilize edilebildiğini ve SDS konsantrasyonu CMC'ye kadar arttırıldığında çözeltiyi dağıtma yeteneğinin arttığını göstermişlerdir [58]. Wei vd. Arap zımkı (GA) ve SDS sürfaktanlarının epoksi/grafen nanokompozitlerin özellikleri üzerindeki etkilerini araştırdı. Sürfaktan bulundurmıyan numuneyle karşılaştırıldığında Tg'nin SDS ve GA için sırasıyla yaklaşık 7 °C ve 3 °C arttığını bildirdiler [90].

Anyonik (SDS), katyonik (CTAB, TTAB) ve iyonik olmayan (Triton X-100, Tween 100, Tween 80 ve Tween 20) sürfaktanlar ile yapılan MWCNT dispersiyonları UV-Vis absorbands spektroskopisi ile analiz 500 nm dalgaboyunda Triton X-100' ün en iyi sürfaktan olduğu kaydedilmiştir [93][74].

Ağırlıkça % 1 - % 5 arasında MWCNT nano katkısı ile üretilmiş CFRP'lere yapılan 3 nokta eğme testi sonuçlarına göre MWCNT konsantrasyonu azaldıkça kırılma tokluğunda artış olmuştur [94]. Shen vd. ise MWCNT katkılı CFRP nanokompozitlerde ağırlıkça % 2 katkılama da homojen dağılım olmdığını aglomearsyon oluştuğunu ve dolayısıyla ağırlıkça % 1 katkılı nanokompozitlerin eğme modülü ve eğme dayanımının daha yüksek olduğunu bulmuşlardır [95].

Ghosh vd. % 1,5 MWCNT katkılı nanokompozitlerin katkısız kompozitlere göre tokluğunda % 36 ve çekme mukavemetinde % 21 ve artış sağlandığını belirtmişlerdir [96].

Zakaria vd. ağırlıkça % 0,5 - 3 arasında farklı oranlarda MWCNT katkılı polimer matrisli nanokompozitlerin çekme ve eğme dayanımlarında ağırlıkça % 1 MWCNT katkılamanın % 26 çekme ve % 38 eğme dayanımı ile en iyi nanokompozit olduğunu tespit etmişlerdir [97].

Wang ve Chai, ağırlıkça % 0,5 GNP katkılı CFRP nanokompozitlerin termal iletkenliğinin katkısız kompozitle karşılaştırıldığında % 55,6 arttığını bildirdi [98]. Rafiee vd. kürlenmiş katkısız epoksi ile karşılaştırıldığında, GNP katkılı epoksi nanokompozitlerin CO ve CO₂' den oluşan oksijen içeren fonksiyonel grupların pirolizi nedeniyle 275 °C ile 375 °C arasında daha düşük Tg ve yaklaşık % 80 ağırlık kaybı gösterdiğini gözlemledi. Bu durumu nanokompozitlerdeki epoksi matrisinin,

GNP'lerin topaklaşmasından dolayı katkısız epoksiden daha düşük derecede çapraz bağlanma göstermesinden kaynaklandığını bildirdiler. Ayrıca % 1 GNP katkılı GFRP'lerde maksimum ısı iletkenlik artışı % 12,6 tespit etmişlerdir [99].

Yan vd. GNP kaplı CFRP'lerin elektriksel iletkenliğinin katkısız CFRP kompozitlere kıyasla %165 oranında arttığını bildirmişlerdir [28].

Kim vd, bir fenolik reçine içinde homojen bir şekilde dağılmış ağırlıkça % 7 CNT'lerin, bitişik karbon fiberler arasında etkili bir termal köprü görevi görerek termal iletkenlikte 250'den 393 W/(m·K)'ye bir artışa yol açtığını göstermişlerdir [29]. Ayrıca elektrik iletkenliğinin de $8.5 \times 10^{-2} \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$ 'den $2.17 \times 10^{-1} \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$ 'e yükseldiği gözlemlendi [100].

Ağırlıkça % 1'den küçük GNP katkısı ile CFRP malzemelerin mekanik özelliklerinin katkısız CFRP kompozitlerden daha iyi olduğu sonucuna varılmıştır. Ağırlıkça % 0,2 ile % 1 arasında GNP katkısının bile kompozitlerin özelliklerini önemli düzeyde iyileştirebilmektedir [12,79,98,101].

Muralidhara vd. GNP katkılı nanokompozitlerin mekanik etkisini bir çekme mukavemeti testiyle incelemişlerdir. En iyi çekme mukavemetinin, ağırlıkça % 1,75 GNP katkılı nanokompozitlerde % 3' lük bir artış olduğunu bulmuşlardır [79].

GNP'lerin çatlak köprüleme ve çatlak engelleme özelliklerinden dolayı, ağırlıkça % 1 GNP katkısı, polimerlerde basma mukavemetinde % 144'lük bir artışa ve bükülme dayanımında % 216'lık bir artışa neden olmuştur [102]. GNP'nin metal matrisli kompozitlerde başarılı bir şekilde dağıldığı, güçlü arayüzey bağlarının oluştuğu, ağırlıkça % 0,3 katkılı numunelerde sertliğin % 11 arttığı, ancak % 0,6'ya kadar katkılı numunelerde çekme mukavemetinin azaldığı tespit edilmiştir [103].

Ağırlıkça % 0,25 gibi düşük oranlarda GNP katkılı nanokompozitlerin fiber-matris arayüzeylerinde daha homojen bir dağılıma sahip olduğu rapor edilmiştir. Daha fazla GNP eklenmesi nanokompozitlerde topaklaşmaya neden olmuştur [89]. Le vd. CF içermeyen ağırlıkça % 0,2 GNP içeren kompozitin çekme mukavemetinin % 86,8

oranında arttığını ve daha fazla katkı maddesi ile iyileşmenin önemli ölçüde azaldığını bulmuşlardır [5]. GNP parçacıklarının topaklaşması, GNP' nin polimer matris nanokompozitlerinin etkili özelliklerini geliştirme yeteneğini azaltan en önemli sorunlardan biridir. Dolayısıyla, GNP ile çalışmanın ana zorluklarından biri, topaklaşmaması ve epoksi matris içinde homojen bir şekilde dağılmasıdır [45].

Ayrıca yukarıda verilen literatür bilgilerinin haricinde GNP veya CNT nano katkısının epoksi matrisine katkılandırılması ve üretilen nanokompozitlerin termal iletkenlik, elektriksel iletkenlik ve mekanik özellikleri üzerine yapılan literatür taraması Çizelge 1.1'de verilmiştir.

Çizelge 1.1. GNP veya CNT nano katkısının epoksi matrisli kompozitlere katkılandırması üzerine yapılan literatür taraması.

Araştırmacılar	Nano katkı	Takviye	Matris	Analiz	Sonuç
Muralidhara vd. [79]	GNP	CF	Epoksi	Çekme Testi	%1,75 katkılı numunede % 3 artış
Kaftelen-Odabaşı vd. [76]	GNP	CF	Epoksi	Eğme Testi	% 0,05 katkılı numunede % 6 artış
Le vd. [5]	GNP	-	Epoksi	Çekme Testi	% 0,2 katkılı numunede % 86,8 artış
Shivakumar vd. [104]	GNP	CF	Epoksi	Çekme, Darbe, Eğme Testleri	% 1 katkılı numunede % 10 darbe dayanımı artış, eğme ve çekme dayanımında % 4 artış
Namdev vd. [86]	GNP	CF	Epoksi	Çekme, Darbe, Eğme Testleri	% 0,5 katkılı numunede % 18 çekme ve % 18 bükme mukavemetinde artış
Alsaadi vd. [105]	GNP	KF+CF	Epoksi	Çekme, Darbe, Eğme Testleri	% 0,5 katkılı numunede % 9,9 çekme ve % 9,7 bükme mukavemetinde artış
Wang vd. [98]	GNP	CF	Epoksi	Bükme Testi Termal Test	% 0,3 katkılı numunede % 27 bükme mukavemetinde artış ve % 60 termal iletkenlikte artış
Wu vd. [36]	GNP	-	Epoksi	Elektrik ve Termal iletkenlik	Saf GNP 2100 S·cm ⁻¹ GNP+%30 epoksi (hac.) 700 S·cm ⁻¹
Qin vd. [106]	GNP	CF	Epoksi	Eğme Testi Elektrik iletkenlik	% 4 kaplanmış numunede % 52 bükme mukavemetinde artış ve % 150 elektriksel iletkenlik artış
Yue vd. [31]	GNP/CNT	-	Epoksi	Eğme Testi Elektrik iletkenlik	Eğme mukavemeti GNP katkılı numunede % 50 daha iyi CNT0,8 + GNP0,2 % 100 artış
Lonjon vd. [100]	CNT	CF	Epoksi	Elektrik iletkenlik	%0,12 katkılı numunede 10 S·cm artış
Geng vd. [107]	MWCNT	-	Epoksi	Mekanik Testler	% 0,05 katkılı numunede % 6 bükme mukavemetinde artış

Gresil vd. herhangi bir fiber takviyesi kullanmadan epoksi matrisine GNP katarak termografi yöntemiyle ürettikleri nanokompozitin termal iletkenliğini ölçmeye çalışmışlardır. Dispersiyon sonrası işlem ağırlıkça % 5 GNP katkılı nanokompozitin termal iletkenliğinde % 400'e kadar bir artış göstermiştir. Ağırlıkça % 10'a kadar GNP katkılamanın termal iletkenlikte lineer olarak artan bir eğilim ile doğrulanmıştır. Termografi yayılım ölçümü ve haritalama yönteminin, nispeten büyük numuneler için makro ölçekte grafen nanoplatelet dispersiyonunun kalitesini karakterize etmek için güvenilir, kolay ve düşük maliyetli bir teknik olduğu doğrulanmıştır. Bu anizotropik davranış havacılık sanayisinde buz çözme veya yıldırım çarpmasına karşı koruma gibi özel uygulamalar için uygun olabileceğini açıklamışlardır [108].

Taraghi vd. yaptıkları çalışmada kevlar kumaş takviyeli bal peteği çekirdekli ve MWCNT katkılı sandviç kompozitlerde termografik muayenenin hassasiyetini incelemişlerdir. 5-6-7-8 mm çaplarında yapay hatalar ve 10-15-20-25 mm uzunluklarında yapay çentikler 1 kat kevlar fiber (KF) kumaşın altına ve bal peteği çekirdeğinin üzerine yerleştirilmiştir. Yüzeyin hemen altında bulunan yapay hataları hassas bir şekilde tespit edebilmişlerdir, çentiklerin geometrik şeklinin tam tespit edilemediği ancak yuvarlak hataların geometrik şeklinin daha belirgin tespit ettiklerini ve MWCNT nano katkısının termografi ile hata tespitini kolaylaştırdığını açıklamışlardır [109].

Nano katkıların CFRP kompozitlere katkılandırması ve termografik muayenenin hassasiyetinin belirlenmesine dair açık literatürde henüz çalışma yoktur.

Bununla birlikte GNP ve CNT nano katkısının epoksi matrisine katkılandırılması ve üretilen nanokompozitlerdeki yapay hataların tespitinde termografi muayenesinin kullanılabilirliği üzerine yapılan literatür taraması Çizelge 1.2'de verilmiştir.

Çizelge 1.2. GNP veya CNT nano katkısının epoksi matrisli kompozitlere katkılanarak termografi yönteminin uygulanabilirliği üzerine yapılan literatür taraması.

Araştırmacılar	Nano katkı	Takviye	Matris	Termografik Kontrol	Sonuç
Taraghi vd. [109]	MWCNT	KF + Bal peteği çekirdek	Epoksi	Termografi	Yüzey hataları
Gresil vd. [108]	GNP	-	Epoksi	Termografi	Yüzey hataları
Choi vd. [110]	-	CF+ Bal peteği çekirdek	Epoksi	Termografi	Yüzey hataları
Usamentiaga vd. [111]	-	CF	Epoksi	Termografi	Yüzey hataları
Svantner vd. [112]	-	CF	Epoksi	Termografi Pals Termografi	0,11 mm derinlikte hata tespiti 1,30 mm derinlikte hata tespiti
Lopez vd. [113]	-	CF+ Bal peteği çekirdek	Epoksi	Pals Termografi Simülasyonu Termografi	0,4 mm derinlikte hata tespiti 0,6 mm derinlikte hata tespiti
Meola vd. [114–116]	-	CF	Epoksi	Lock in Termografi	0,65 mm derinlikte hata tespiti
Bu Çalışma	FGNP	CF	Epoksi	Lock in Termografi ve Pals Termografi	Elektrik iletkenliği % 50 artış Tg % 10 artış Çekme dayanımı % 92 artış Darbe Dayanımı %28 artış Sertlik HV3 %100 artış; Shore D %14 artış LT ile 4,8 mm derinlikte hata tespiti

Tez çalışmasında şu ana kadar hiç yapılmayan havacılık CFRP kompozitlerinin mekanik özelliklerinin, termal ve elektrik iletkenliğinin geliştirilmesi için havacılık matris malzemesi olan Araldite LY5052/Aradur LY5052 epoksi sistemlerine FGNP veya FMWCNT katkılanması yapılmıştır. Her ne kadar açık literatürde farklı kompozit üretim teknikleri ve farklı matris malzemeleri kullanılmış olsa da VBM metodunu kullanarak epoksi sistemlerine FGNP veya FMWCNT katkılanması ilk defa yapılmıştır. VBM metodu ile kompozit malzemede atık epoksi vakum battaniyesine emdirilerek daha hafif kompozitler üretilir, ayrıca matris ve fiber arasındaki hava boşlukları yok edilerek arayüzey yapışması güçlendirilir ve matris çatlakları önlenir. Araldite LY5052/Aradur LY5052 epoksi sistemleri ve herhangi bir

nano katkı ile üretilmiş nanokompozitlerde termografi metodu ile hata tespiti sınırlıdır, FGNP veya FMWCNT katkılılandırılması ile üretilmiş nanokompozitlerde termografi ile hata tespit etmek ve termografi metodunun uygulanabilirliği üzerine hiç çalışma yapılmadığı görülmüş ve literatürdeki eksiklik tamamlanmıştır.

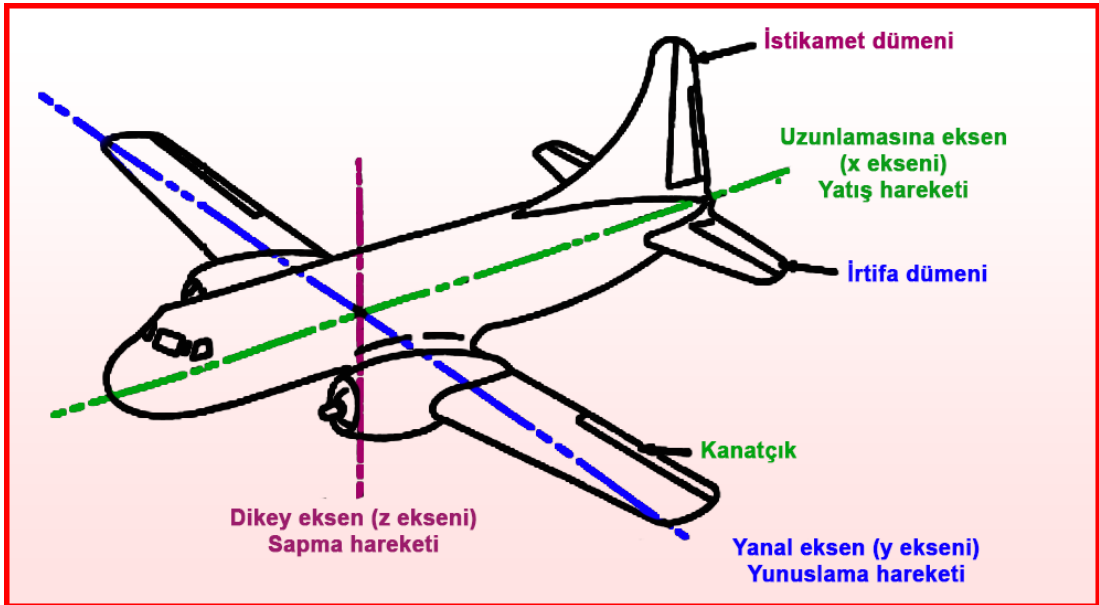
Bu çalışmadaki kritik noktalar

1. GNP veya MWCNT' nin fonksiyonlaştırma yöntemi ve sürfaktan seçimi.
2. Homojen dağılım için sürfaktanın CMC miktarına göre çözeltiye eklenmesi.
3. FGNP katkılı ve FMWCNT katkılı CFRP nanokompozitlerin ayrı ayrı üretilmesi.
4. Elektrik iletkenliği sonuçlarındaki iyileşme oranına göre FGNP katkılı nanokompozitin seçilmesi.
5. FGNP katkılı nanokompozitlerin mekanik özelliklerinin, termal ve elektrik iletkenliğinin araştırılması.
6. FGNP katkılı nanokompozitlerde darbe hasarının floresan penetrant ile kontrolü (FPI).
7. FGNP katkılı nanokompozitlerde termografi metodunun uygulanabilirliğinin kontrolü.

BÖLÜM 2

UÇAK UÇUŞ KONTROL KUMANDA YÜZEYLERİ

Uçaklar rotayı takip edebilmek için 3 eksen etrafında hareket ederek ilerler ve bu 3 eksen etrafında kararlılıkları olmalıdır. Bu eksenler uzunlama eksen (x eksen), yanal eksen (y eksen) ve dikey eksen (z eksen). Şekil 2.1’de verilen resimde gösterildiği üzere uzunlamasına eksen etrafında uçak kanadının firar kenarının uçlarında bulunan kanatçıklar kullanılarak sağa sola yatış hareketi yapılır. Yanal eksen etrafında yatay stabilizenin arkasında bulunan irtifa dümeni kullanılarak dalış tırmanış (yunuslama) hareketi yapılır ve dikey eksen etrafında dikey stabilizenin arkasında bulunan istikamet dümeni kullanılarak sağa sola sapma hareketleri yapılır. Havanın uçak kanadı ile ilk karşılaştığı kenara hücum kenarı ve uçak kanadını terk ettiği kenara ise firar kenarı denilir [117,118].



Şekil 2.1. Uçuş eksenleri ve uçak ana uçuş kontrol kumanda yüzeyleri.

2.1. ANA UÇUŞ KONTROL KUMANDA YÜZEYLERİ

Bir uçak, komutsuz veya komutlu hareketler nedeniyle 3 eksenin etrafında dönebilir. Uçuş sırasında hava akışı bozuklukları nedeniyle sıklıkla komutsuz hareketler meydana gelir. Komuta edilen hareketler, ana uçuş kontrol yüzeylerinin saptırılması yoluyla gerçekleştirilir[119]. Ana uçuş kumandaları uçağa 3 temel hareketi verebilmemizi sağlayan kanatçık, irtifa dümeni ve istikamet dümeni. Üç temel hareket kanatçıklar tarafından sağlanan yatış hareketi, irtifa dümeni tarafından sağlanan yunuslama hareketi ve istikamet dümeni tarafından sağlanan sapma hareketidir [117,118,120].

2.1.1. Kanatçık

Uçağın firar kenarında en uçlarda bulunur, uçağa x eksenini etrafında sağa sola yatış hareketi yaptırır, pilotun lövyeyi sağa sola hareket ettirmesiyle çalışır. Uzunlamasına ekseninde (x) kararlılık sağlar. Kanatçıklar birbirine göre zıt çalışır, bir kanatçık yukarı kalkarsa diğer kanatçık aşağı iner ve uçak yukarı kalkan kanatçığa doğru yatış yapar. Karbon fiber takviyeli polimer matrisli kompozitten üretilirler. Kullanım esnasında x ve z eksenlerinde uzama gerilmesi, kalkış esnasında pistte bulunan yabancı maddelerin (vida, somun, perçin, taş vs) çarpması, kuş veya dolu çarpması sonucu darbe hasarı alabilirler [118–121].

2.1.2. İrtifa Dümeni

Kuyruktaki yatay stabilizenin arkasında bulunur, uçağa y eksenini etrafında dalış tırmanış (yunuslama) hareketi yaptırır, pilotun lövyeyi ileri geri hareket ettirmesiyle çalışır. Yanal ekseninde (y) kararlılık sağlar. İrtifa dümeninin yukarı kalkması durumunda uçak burun yukarı hareketi, aşağı inmesi durumunda uçak burun aşağı hareketi yapar [121]. Karbon fiber takviyeli polimer matrisli kompozitten üretilirler. Kullanım esnasında x ve z eksenlerinde uzama gerilmesi, kalkış esnasında pistte bulunan yabancı maddelerin (vida, somun, perçin, taş vs) çarpması, kuş veya dolu çarpması sonucu darbe hasarı alabilirler [118–120].

2.1.3. İstikamet Dümeni

Kuyruktaki dikey stabilizenin arkasında bulunur, uçağa z eksenini etrafında sağa sola sapma hareketi yaptırır, pilotun pedallara basmasıyla hareket ettirilir. Dikey ekseninde (z) kararlılık sağlar. İstikamet dümeninin sağa açılması uçağı sağa, sola açılması ise sola saptırma hareketi yaptırır [122]. Karbon fiber takviyeli polimer matrisli kompozitten üretilirler. Kullanım esnasında x ve y eksenlerinde uzama gerilmesi, kalkış esnasında pistte bulunan yabancı maddelerin (vida, somun, perçin, taş vs) çarpması, kuş veya dolu çarpması sonucu darbe hasarı alabilirler [118–121].

2.2. YARDIMCI UÇUŞ KUMANDA KONTROL YÜZEYLERİ

Ana uçuş kontrol kumanda yüzeyleri görevlerini yerine getirirken onlara yardımcı olan, uçuş emniyetini arttıran kumanda yüzeyleridir. Şekil 2.2’de verildiği üzere uçak yardımcı uçuş kontrol kumanda yüzeyleri slat, flap, hız kesici ve fletener olarak incelenir.

2.2.1. Slat

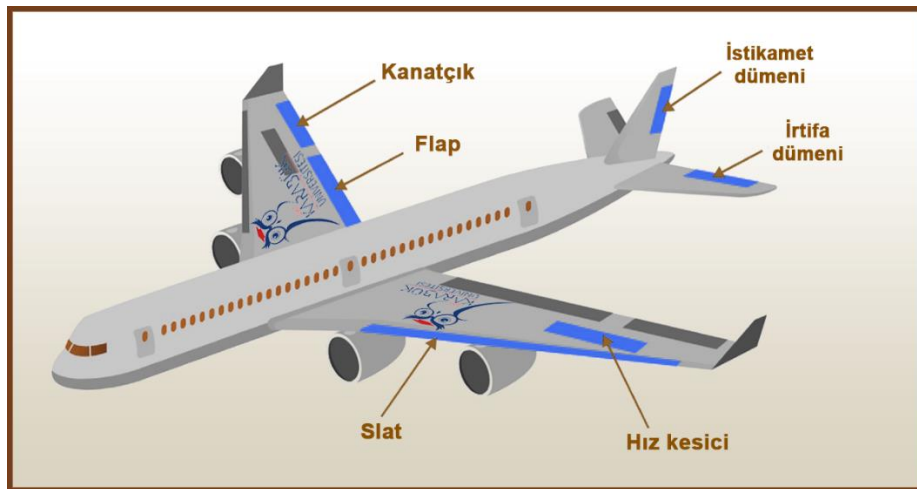
Kanadın hücum kenarında bulunur, uçak hızının çok düşük olduğu ve ani irtifa kaybı ihtimalinin yüksek olduğu iniş ve kalkış uçuş safhalarında kullanılır. İniş ve kalkış esnasında uçaklara yeryüzüne oldukça yakın oldukları için ani irtifa kaybı kaza ile sonuçlanabilir, uçak hızının bu safhalarda düşük olması taşıma kaybı oluşturur, bu taşıma kaybını önlemek için hücum kenarında bulunan slatlar açılır kanadın kamburluğunu artırır. Böylelikle kanadın üst yüzeyi ve alt yüzeyi arasındaki basınç farkını arttırarak taşımayı arttırmış olur. Aynı zamanda kanadın önünde oluşan havanın ayrışma noktasına girerek sınır tabakasını yeniden enerjilendirerek ani irtifa kaybını önler. Slatlar havanın düzgün akışının sağlanması ve buzlanmayı önlemek için uçuş boyunca ısıtılırlar, dolayısıyla alüminyum 7075 alaşımlarından oluşmaktadır [123–126].

2.2.2. Flap

Kanadın firar kenarında bulunur, uçak hızının çok düşük olduğu ve ani irtifa kaybı ihtimalinin yüksek olduğu iniş ve kalkış uçuş safhalarında kullanılır. İniş ve kalkış esnasında uçaklara yeryüzüne oldukça yakın oldukları için ani irtifa kaybı kaza ile sonuçlanabilir, uçak hızının bu safhalarda düşük olması taşıma kaybı oluşturur. Bu taşıma kaybını önlemek için firar kenarında bulunan flaplar açılır kanadın yüzey alanını arttırarak taşımayı arttırırlar. Flap ve slatlar birlikte açılır, birlikte kapanırlar. Karbon fiber takviyeli polimer matrisli kompozitten üretilirler. Kullanım esnasında x ve y eksenlerinde uzama gerilmesi, kalkış esnasında pistte bulunan yabancı maddelerin (vida, somun, perçin, taş...) çarpması, kuş veya dolu çarpması sonucu darbe hasarı alabilirler [123–127].

2.2.3. Hız Kesiciler

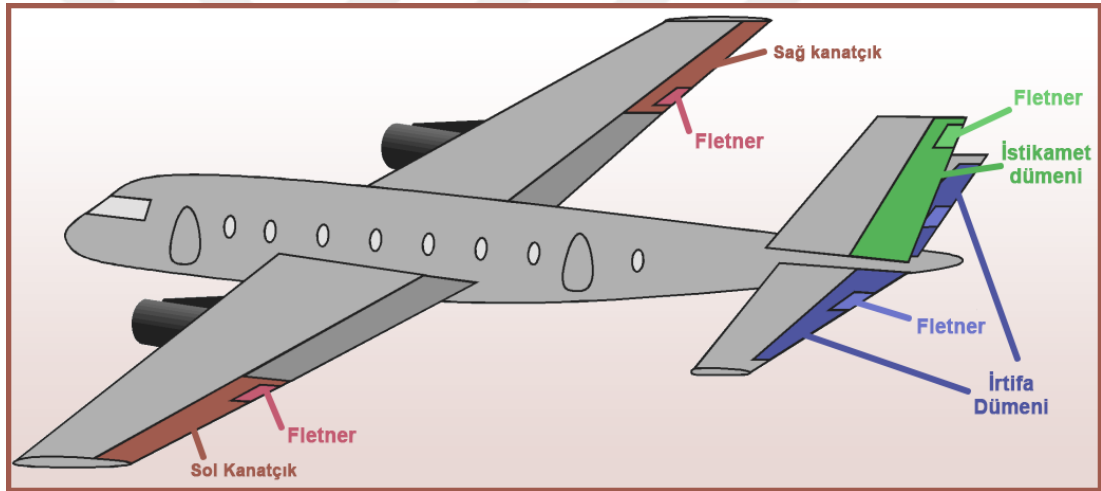
Uçak kanatlarının üst yüzeylerinde bulunur. Kanat köküne yakın olanlar havada kanatçıklara yardımcı olur ve uçağın koordineli viraj almasını sağlarlar, yerde ise hem kanat köküne yakın olanlar hemde kanat ucuna yakın olanlar açılarak fren yapmayı sağlarlar. Karbon fiber takviyeli polimer matrisli kompozitten üretilirler. Kullanım esnasında x ve y eksenlerinde uzama gerilmesi, kalkış esnasında pistte bulunan yabancı maddelerin (vida, somun, perçin, taş...) çarpması, kuş veya dolu çarpması sonucu darbe hasarı alabilirler [123–127].



Şekil 2.2. Yardımcı uçak uçuş kontrol kumanda yüzeyleri.

2.2.4. Fletner

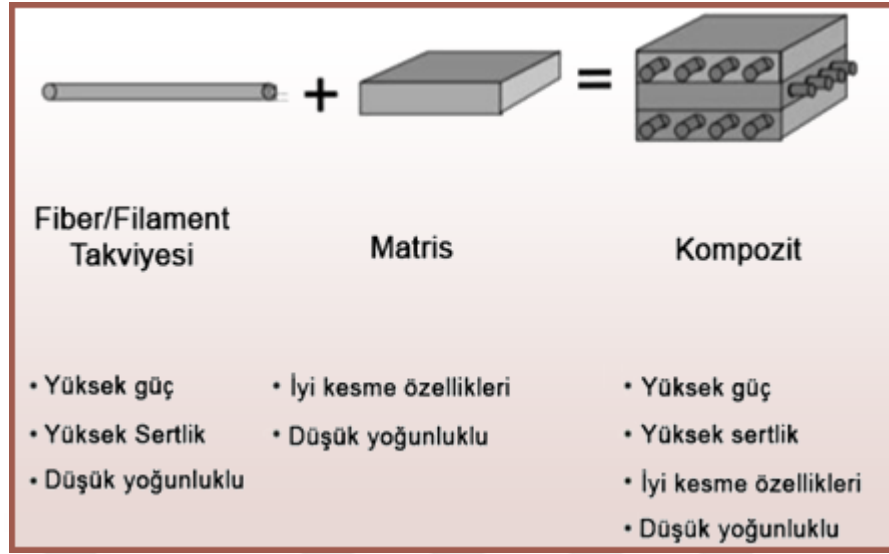
Ana uçuş kumanda kontrol yüzeylerinde bulunurlar. Uçuş esnasında pilotun işini kolaylaştırmak ve küçük hareketler için büyük kontrol kumandası yerine sadece fletner hareket ettirilerek uçak yönlendirilebilir. Ayrıca x, y ve z eksenlerinde kararlılığı sağlamak için bazen 2-3° lik küçük küçük sapmaların kontrolünde kullanılır. Karbon fiber takviyeli polimer matrisli kompozitten üretilirler. Kullanım esnasında x, y ve z eksenlerinde uzama gerilmesi, kalkış esnasında pistte bulunan yabancı maddelerin (vida, somun, perçin, taş vs) çarpması, kuş veya dolu çarpması sonucu darbe hasarı alabilirler [120,123–127]. Şekil 2.3'te uçak uçuş kumanda yüzeyleri fletnerleri verilmiştir.



Şekil 2.3. Uçak uçuş kumanda yüzeyleri fletnerleri.

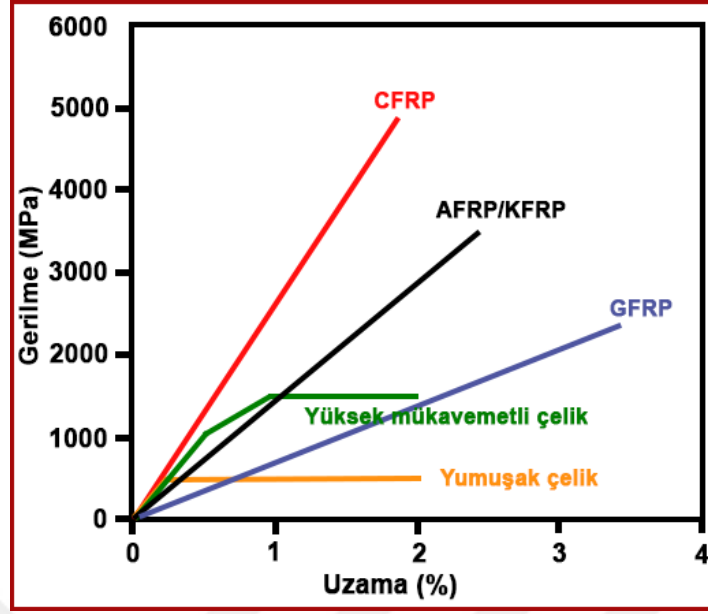
2.3. KOMPOZİT MALZEMELER

Kompozit malzemeler en az iki veya daha fazla bileşenin oluşturduğu ve her bir bileşenin güçlü yanlarını alarak ağırlık, iletkenlik, mukavemet, korozyon dayanımı gibi avantajlar sunan mühendislik malzemesidir. Şekil 2.4'te verildiği gibi kompozit malzemeler, matris fazı ve takviye fazı olmak üzere iki temel bileşenden oluşur. Takviye bileşeninin temel görevi matris bileşenini takviyelendirerek oluşan kompozit yapıya dayanım ve mukavemet özellikleri kazandırmaktır. Matrisin rolü, takviye parçacıklarını yerinde tutmak ve desteklemektir [128–131].

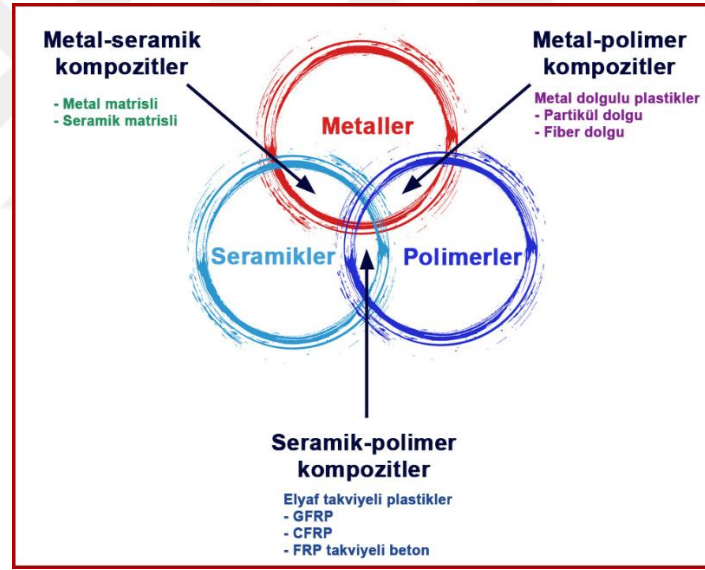


Şekil 2.4. Kompozitlerin bileşimi [132].

Kompozitlerin yüksek spesifik sertlik ve mukavemet gibi çok önemli avantajlara sahiptir. Bu nedenle kompozitler kullanılarak mukavemet ağırlık oranı büyük ölçüde arttırılabilir. Şekil 2.5; kompozitlerin ve geleneksel malzemelerin spesifik mukavemet ve modül değerlerini göstermektedir. Cam fiber takviyeli kompozitler çeliğin dörtte biri ağırlığında ve karbon fiber takviyeli kompozitler çeliğin onda biri ağırlığında olup çelikten daha fazla mukavemet gösterebilmektedir. Yakıt tasarrufu, minimum egzoz emisyonu ve çevre dostu ulaşım için havacılık ve otomobil sektörlerinde ağırlığın azaltılması büyük bir motivasyon kaynağıdır. Şekil 2.6'da verildiği gibi farklı malzemelerin birleşmesi ile meydana gelen kompozit malzemeler bütün sektörlerde diğer konvansiyonel malzemelere göre belirgin bir avantaja sahiplerdir [133].



Şekil 2.5. Çeşitli takviye fiberleri için çekme gerilmesi gerinim diyagramları [134].



Şekil 2.6. Kompozit malzemelerin gelişimini gösteren mühendislik malzemesi sınıfları arasındaki ilişki [135].

Kompozitlerin bir diğer avantajı ise enerji verimliliğidir. Günümüzde kullanılan kompozitlerin çoğu polimer matrisli kompozitlerdir. Polimer matrisli kompozitler oda sıcaklığında veya oda sıcaklığının üzerinde üretilir ve oda sıcaklığının birkaç yüz derece üzerinde kullanılabilir avantajlarına sahiptirler. Hem hafifliklerinden dolayı kullanım esnasında enerji tasarrufu sağlarlar hem de üretimi esnasında çok az enerjiye ihtiyaç duyulur. Daha önce de belirtildiği gibi polimer kompozitlerin uçak ve

otomobillerde yaygın olarak kullanılması toplam ağırlığı azaltacak ve dolayısıyla yakıt verimliliğini artıracaktır. Kompozitler bu iki nedenden dolayı enerji açısından verimlidir.

Polimerlerde oksitlenme olmadığı için açık hava koşullarından kaynaklanan korozyona karşı metalik malzemelerden daha dayanıklıdır.

Polimer matrisli kompozit üretiminde fiberleri herhangi bir özel yönde hizalamak mümkündür. Kompozitler yönsel özelliklere sahiptirler ve fiber yönü boyunca mekanik özellikler yüksek olacaktır. Dolayısıyla fiber dizilimi kompozitin kullanılacağı yerdeki mekanik özellikleri karşılayacak şekilde yapılması mümkündür. Mühendislik gereksinimlerini karşılayacak kompozitler üretmek mümkündür. Uygun matris, uygun takviye ve uygun üretim metodu, çok çeşitli takviyeler, matrisler ve üretim metotları arasında seçilebilir [115,133,136].

2.3.1. Matris

Matris, gerekli şekli oluşturmak için takviyeyi korurken, takviye matrisin tüm mekanik özelliklerini artırır. Matris, genellikle takviyenin gömülü olduğu ve matris boyunca homojen şekilde dağıtılması gereken monolitik bir malzemedir. Matris elemanı malzemeye uygulanan kuvveti ara yüzey bağı vasıtasıyla takviye edici faza iletir ve dağıtır, homojen dağılmayan matris fazı kuvvetin eşit dağılmasını önler, malzemede hasar oluşumuna sebep olur [128–131].

2.3.2. Takviye

Takviye elemanı; matris yapının tane büyüklüğünü kontrol eder ve malzemeye uygulanan kuvveti paylaşarak mukavemet gösterir. Matris ve takviye elemanlarını birbirine bağlayan arayüzey bağı ise kırılma özelliğinde olup gelen yükü takviye elemanına iletir. Kompozit malzemelerin elastikiyet modülünü belirleyen en önemli yapı taşı arafazda oluşan arayüzey bağlarıdır. Yükün takviye elemanına iletilebilmesi için bileşenler arasında fiziksel ve kimyasal uyumun iyi olması, ara yüzey bağının güçlü olması gerekir [128–131].

Kompozitler birçok şekilde sınıflandırılabilir, ancak genel olarak kompozitleri matris sistemine göre veya takviye elemanına göre sınıflandırmak mümkündür.

2.3.3. Matris Sistemine Göre Kompozitler

Kompozitler matris sistemine göre üç ana gruba ayrılırlar: Seramik matrisli kompozitler, metal matrisli kompozitler ve polimer matrisli kompozitler [130].

2.3.3.1. Seramik Matrisli Kompozitler

Seramiklerin yüksek sıcaklık dayanımı, hafiflik, sertlik, aşınma direnci gibi özellikleri yüksek sıcaklık uygulamalarında hidrokarbon yapısı nedeniyle kullanılamayan polimerlerin yerine ve yüksek yoğunluğa sahip metallere alternatif olarak seramik matrisli kompozitler kullanılmaktadır [137].

Seramik matrisli kompozitler olağanüstü korozyon direncine, yüksek erime noktalarına, üstün basınç dayanımına ve yüksek sıcaklıklarda stabiliteye sahiptir. Gaz türbinli motorlarda yanma odasında, türbin kanatçıkları gibi 1700 °C ve üzeri gibi yüksek sıcaklık uygulamaları için seramik matrisler düşük NO_x kirliliği sağladığından yaygın tercihtir. Yüksek sıcaklıklarda hayatta kalabilirler ve aşındırıcı ortamlarda verimli bir şekilde çalışabilirler. Bu malzemelerde temel hedef dayanıklılığı arttırmaktır, çünkü monolitik seramikler kırılgandır ancak yüksek sertlik ve mukavemete sahiptir [138], [139].

2.3.3.2. Metal Matrisli Kompozitler

Metal matris kompozitleri yaygın olarak gelişmiş malzemeler olarak kabul edilmektedir. Üstün aşınma direnci ve olağanüstü termal iletkenliği kapsayan gelişmiş mekanik ve termal özellikler açısından geleneksel malzemelerden daha iyidir. Günümüzde yaygın olarak kullanılan matris metalleri alüminyum, bakır, demir, magnezyum, nikel ve titanyumdur. Alüminyum alaşımları, iyi şekillendirme ve birleştirme özellikleri, düşük yoğunluğu, mükemmel mukavemeti ve korozyon direnci nedeniyle çoğunlukla otomobil ve havacılık sektöründe yapısal uygulamalarda

kullanılmaktadır. Titanyum alaşımları, yüksek sıcaklıktaki üstün mukavemeti ve iyi korozyon direnci nedeniyle tipik olarak havacılık bileşenlerinde kullanılır. Ancak oldukça pahalı bir malzemedir. Magnezyum, genellikle elektronik ekipmanlarda ve havacılık uygulamalarına yönelik dişli kutusu muhafazalarında kullanılan demir dışı metaller arasında en hafif olanıdır [140], [141].

2.3.3.3. Polimer Matrisli Kompozitler

Yüksek mukavemet, mükemmel darbe, sıkıştırma, yorulma özellikleri; uygun maliyetli üretim ve işleme süreçleri, olağanüstü kimyasal ve korozyon direnci, düşük maliyetli kimyasal eylemsizlik ve hafiflik özelliklerinden dolayı günümüzde yaygın kullanılmaktadır. Roket, hava aracı, uçak, savunma sanayi, spor ekipmanlarında ve birçok alanda tercih edilmektedir. Polimer matrisli kompozitler, karbon, cam, aramid ve doğal elyaf gibi bir ile Çizelge 2.1’de verilen termoplastik veya termoset matrislerden oluşur. Polimerler uygun şekilde işlenebildikleri için iyi bileşenler üretirler [141].

Termoplastik Polimerler

Termoplastik polimerlerin ağ yapısı çok azdır veya hiç yoktur. Bu nedenle çoğu zaman solventte çözünürler ve kolaylıkla eriyebilirler. Kauçuklar hafif çapraz bağlantılıdır, bu da zincirlerin gerildiğinde çok fazla kaymasını önler, entropi çoğunlukla geri çekme kuvvetinden sorumludur [142].

Termoset Polimerler

Isıyla sertleşen polimerler veya termosetler yoğun şekilde çapraz bağlıdır, bu da onları çözünmez ve erimez hale getirir. Termosetler uzun hidrokarbon zincirlerinden oluşur. Fakat bu molekül zincirleri birbirlerine daha kuvvetli kovalent bağlar ile bağlanması termosetlerle termoplastikler arasındaki en önemli farktır. Termosetler yüksek mukavemetli, rijit ve daha az sünektirler [142]. Epoksiler termosetler arasındaki kıyaslamaya göre yüksek mukavemetli olduğu için havacılık CFRP kompozitlerinde ve yapıştırıcılarında tercih edilir. Epoksiler iyi termomekanik, elektriksel ve kimyasal

direnç özelliklerine sahiptirler. Ayrıca, katmanlara ayrılmayı önler ve uzun bir servis ömrü sağlarlar [143].

Çizelge 2.1. Reçine çeşitleri ve özellikleri [144].

Reçine Tipi	Yoğunluk (gm/cm ³)	Poisson oranı	Elastite modülü (GPa)	Gerilme dayanımı (MPa)	Uzama (%)	Maliyet
Polyester (İzoflalik) (s)	1,21	0,36	3,6	60	2,5	1
Polyester (Ortoftalik) (s)	1,23	0,36	3,2	65	2	0,9
Fenolik (s)	1,15	-	3,0	50	2	0,8
Vinil ester (s)	1,12	-	3,4	83	5	1,8
Epoksi (s)	1,20	0,37	3,2	85	5	2,3
Polietersülfon (PES) (p)	1,35	-	2,8	84	60	6,0
Polietereterketon (PEEK) (p)	1,30	-	3,7	92	50	25
Polikarbonat (PC) (p)	1,20	-	2,3	60	100	2,3

s - termoset p - termoplastik

2.3.4. Takviye Elemanına Göre Kompozitler

Fiber takviyeli kompozit malzemeler fiber liflerinin uygun bir matris malzemesi ile birleştirilmesinden elde edilirler. Fiberlerin matris içindeki doğrultuları, yerleşimi ve boyutları kompozitlerin özelliğini büyük ölçüde etkilemektedir. Uzun boyutlardaki fiberlerin matris içerisinde birbirlerine paralel şekilde yerleştirilmeleri ile fiber doğrultusunda yüksek mukavemet, fiberlere dik doğrultuda ise oldukça düşük mukavemet elde edilmektedir. Birbirlerine dik iki doğrultuda yerleştirilmiş fiber durumunda ise iki doğrultuda da yüksek mukavemet elde etmek mümkündür. Fiberleri matris içerisinde homojen olarak dağıtarak yarı-izotropik bir yapı elde edilebilmektedir Kompozit malzemeye uygulanan gerilme fiber doğrultusunda ise kompozit malzemenin dayanım değeri yüksek, fiber doğrultusu dışına çıkıldıkça kompozit malzemenin dayanım değeri düşük olmaktadır.

Fiber takviyeli kompozitlerin mekanik davranışları öncelikle stres transferini mümkün kılan doğal yeteneklerine bağlıdır; bu da fiber mukavemetine, matris mukavemetine ve fiber/matris arasındaki arayüzey yapışma kuvvetine bağlıdır. Fiber takviyeli kompozitlerin mekanik ve tribolojik özelliklerini geliştirmek için uzunlamasına, dokuma keçe, doğranmış elyaf ve doğranmış keçe gibi çeşitli formlarda cam elyaflar kullanılmıştır [145][146]. Kompozitler genel olarak takviye elemanına göre cam fiber

takviyeli kompozitler (GFRP), aramid/keklar fiber takviyeli kompozitler (AFRP/KFRP) ve karbon fiber takviyeli kompozitler (CFRP) olarak sınıflandırmak mümkündür [147].

2.3.4.1. Cam Fiber Takviyeli Kompozitler

Cam elyaflar, tüm fiber takviyeli kompozitlerin yaklaşık %90'ının cam elyaflardan yapılmış olması nedeniyle en yaygın kullanılan polimer takviyelerden biridir. Bunlardan en eski ve en popüler olanı E-cam veya elektrik sınıfı camdır. Diğer cam elyaf türleri arasında A-cam veya alkali cam, C-cam veya kimyasallara dirençli cam ve yüksek mukavemetli R-cam ve/veya S-cam bulunur. Laboratuvar koşullarında cam elyaflar yaklaşık 7000 N/mm^2 'lik çekme gerilmelerine dayanabilirken, ticari cam elyaflar 2800 ila 4800 N/mm^2 'ye ulaşır [145][147]. Hava araçlarında daha çok kargo panelleri, koltuk ve mutfak gereçleri gibi kabin ekipmanlarında kullanılır [148].

2.3.4.2. Aramid Fiber Takviyeli Kompozitler

Kevlar, katı moleküler yapıya sahip bir Poli-para-fenilen-tereftalamid (PPTA) aramid elyafıdır. Kevlar elyafları genellikle hafifliğin, yüksek mukavemetin ve sertliğin, hasar direncinin ve yorulmaya karşı direncin son derece önemli olduğu yüksek performanslı kompozit uygulamalar için kullanılır. Aramid elyaflar genellikle yüksek mukavemet ve düşük ağırlığın yanı sıra yüksek darbe direnci gerektiren uygulamalarda kullanılır.

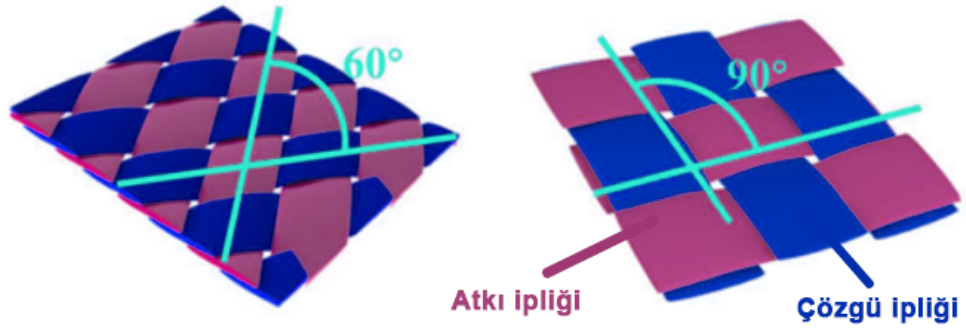
Özellikle uçak yavaşlatıcıları, emniyet kemerleri gibi yüksek darbe direncinin birincil öneme sahip olduğu kesme ve kesilme direncinin istendiği alanlarda kullanılmak üzere birçok kevlar çeşidi üretilmiştir. Kevlar-49, hafifliğin, yüksek mukavemetin ve sertliğin, titreşim sönümlemenin ve hasara, yorulmaya ve gerilim kopmasına karşı direncin temel özellikler olduğu sert takviyeli malzemelerde ve diğer kullanımlarda kullanım için en uygun olanıdır. Güçlendirilmiş kevlar kompozitler, eşdeğer sertlikte cam elyaf kompozitlerin ağırlığından %40'a kadar tasarruf sağlayabilir. Uçak endüstrisi genellikle epoksi kompozitleri güçlendirmek için kevlar-49 kullanır, epoksi sistemlerinin seçimine bağlı olarak aramid kompozitler -196 ila $204 \text{ }^{\circ}\text{C}$ arasında çalışma sıcaklığı aralığına sahiptir [149,150].

2.3.4.3. Karbon Fiber Takviyeli Kompozitler (CFRP)

Karbon fiberler (CF) 207 GPa ile 1035 GPa arasında değişen çeşitli gerilme modülü değerleri ile ticari olarak temin edilebilir. Genel olarak düşük modüllü fiberler yüksek modüllü fiberlere göre daha düşük yoğunluğa, daha düşük maliyete, daha yüksek çekme ve basınç dayanımına ve kopmaya kadar daha yüksek gerilme kuvvetine sahiptir. Karbon fiberlerin avantajları arasında olağanüstü yüksek çekme mukavemeti-ağırlık oranlarının yanı sıra çekme modülü-ağırlık oranları, çok düşük doğrusal termal genişleme katsayısı (uzay antenleri gibi uygulamalarda boyutsal stabilite sağlar), yüksek yorulma mukavemetleri ve yüksek termal iletkenlik (bakırdan daha yüksektir). Dezavantajları ise arızaya karşı düşük gerilim, düşük darbe direnci, korumasız elektrikli makinelerde "kısa devre"ye neden olabilecek yüksek elektrik iletkenliği ve yüksek maliyetli olmasıdır. Çoğunlukla ağırlık tasarrufunun maliyetten daha kritik olduğu havacılık ve uzay endüstrisinde kullanılırlar.

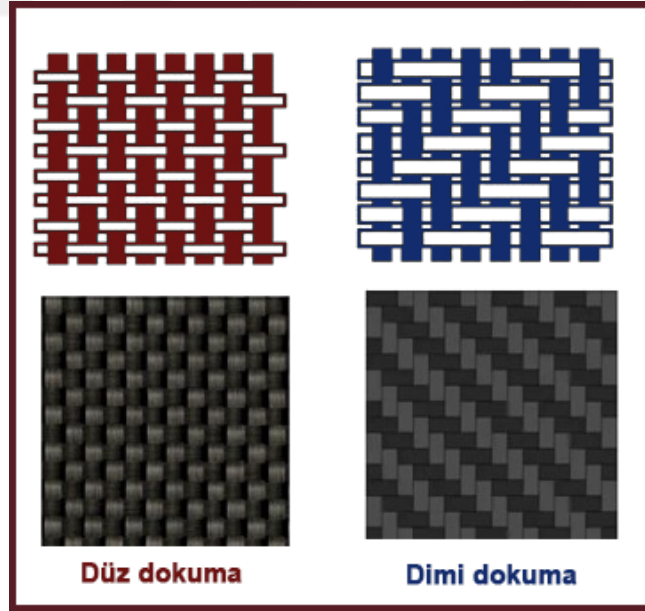
Yapısal olarak karbon fiberler, amorf karbon ve grafit karbonun bir karışımını içerir. Yüksek çekme modülleri, karbon atomlarının paralel düzlemler veya katmanlardan oluşan kristalografik bir yapıda düzenlendiği grafit formdan kaynaklanmaktadır. Her düzlemdeki karbon atomları, birbirine bağlanan düzenli altıgenlerin köşelerinde düzenlenmiştir. Her düzlemdeki karbon atomları arasında güçlü kovalent bağlar mevcuttur, ancak düzlemler arasındaki bağ van der Waals (π - π) tipi bağlardan dolayı oldukça zayıftır [151,152].

2 boyutlu CF kumaşlar dokuma veya örgü ile elde edilebilir. Kumaşlar dokuma türü, yüzey yoğunluğu ve hammadde bakımından farklılık gösterir. Şekil 2.7’de verildiği üzere çözgü ipliği ile atkı ipliğinin birbirine göre dokuma açısı sabit bir açıyla (genellikle 90°) iki yönde yönlendirilir. Dokuma takviye dolgu maddeleri, ürünün 0° ve 90° yönlerde mukavemetini ve sertliğini sağlar. Son zamanlarda çözgü ve atkı ipliklerinin kumaş kenarına göre $\pm 45^\circ$ açıyla uzandığı karbon kumaşlar üretilmektedir. Bu tür kumaşlar $+45^\circ$ ve -45° yönlerdeki yüklere karşı dayanıklıdır [153,154].



Şekil 2.7. Elyaf Dokuma açısı atkı ipliği, çözgü ipliği.

Karbon fiber kumaşların çözgü ve atkı ipliklerinin örgü biçimine göre birçok şekilde dokuması mümkündür. Epoksi matrisinin görevi iki fiber ipliğinin bileşimini sağlamak ve yük altında bile bu durumu muhafaza etmektir. Dokuma faktörü polimer matrisli kompozitlerde mukavemeti etkileyen temel unsurlardandır. Dokuma türüne göre düz, dimi, saten, kıvrımlı ve kıvrımsız kumaşlar üretilmektedir. Maksimum mukavemet ağırlık oranından dolayı havacılık sektöründe en çok Şekil 2.8’de verilen düz ve dimi tip dokuma kumaşlar tercih edilir [155].



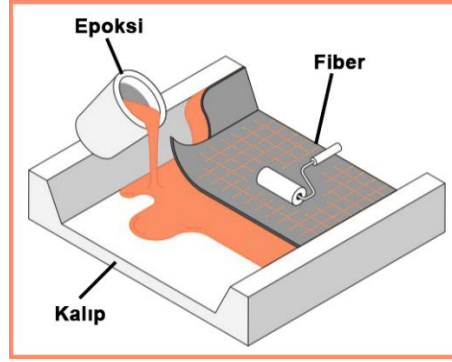
Şekil 2.8. Düz dokuma ve dimi dokuma CF.

2.4. KOMPOZİT ÜRETİM YÖNTEMLERİ

Günümüzde birçok alanda karşılaştığımız kompozit malzemeler özellikle yakıt sarfiyeti özeliğiyle, mukavemet ağırlık oranının yüksek olması, ses ve titreşimi absorbe edebilen özelliğiyle havacılık sanayisinde geniş kullanım alanına sahiptir. İstenilen özelliklerde ve biçimde kompozit üretimi için birçok yöntem kullanılır. Yaygın olarak kullanılan kompozit üretme yöntemleri elle yatırma, püskürtme, filament sarma, reçine transfer kalıplama, vakum infüzyon ve vakum torbalamadır [130,152,156,157].

2.4.1. Elle Yatırma Yöntemi

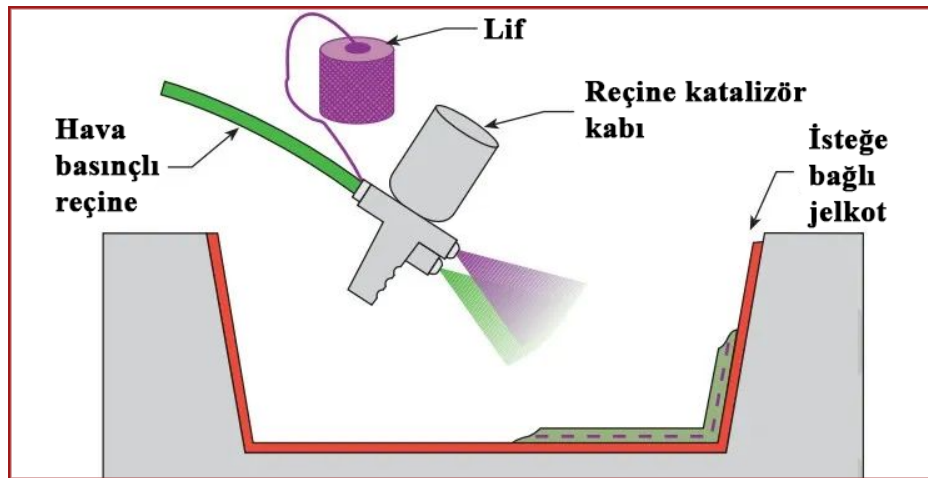
Elle yatırma yöntemi, en az miktarda ekipman gerektirdiği için en yaygın ve en ucuz açık kalıplama yöntemidir. Elyaf takviyeleri bir kalıba elle yerleştirilir ve reçine bir fırça veya rulo ile uygulanır. Bu işlem hem büyük hem de küçük parçaların üretiminde kullanılır. Şekil 2.9’da verildiği gibi elle yatırma işleminde ilk olarak jelkot yüksek kaliteli bir yüzey için önce bir püskürtme tabancası kullanılarak kalıba uygulanır. Jelkot yeterli sertliğe ulaştığında kuru takviye malzemesi tabakaları jelkotun üzerine yerleştirilir. Ardından reçine el ile açık kalıba uygulanır. Bir başka takviye malzemesi ve reçine istenen kalınlık elde edilinceye kadar uygulanır. Takviye malzemesi üzerine uygulanan reçine sertleşene kadar rulolama işlemine tabi tutulur. Rulolama işleminin amacı tabakalar arasında kalan hava kabarcıklarını gidermektir. Önemli bir uygulama olan rulolama işlemi her kat takviye malzemesinden sonra tekrarlanır. Elle yatırma kompozit malzemelerin üretimi için herhangi bir termoplastik veya termoset reçine (epoksi) kullanılabilir. Takviye malzemesi olarak ise elyaflar (Cam, karbon, aramid) kullanılabilir. Ancak ağır aramid kumaşların bu yöntemle ıslatılması (reçine emdirilmesi) çok zordur [157,158].



Şekil 2.9. Elle yatırma yöntemi ile kompozit üretimi [159].

2.4.2. Püskürtme Yöntemi

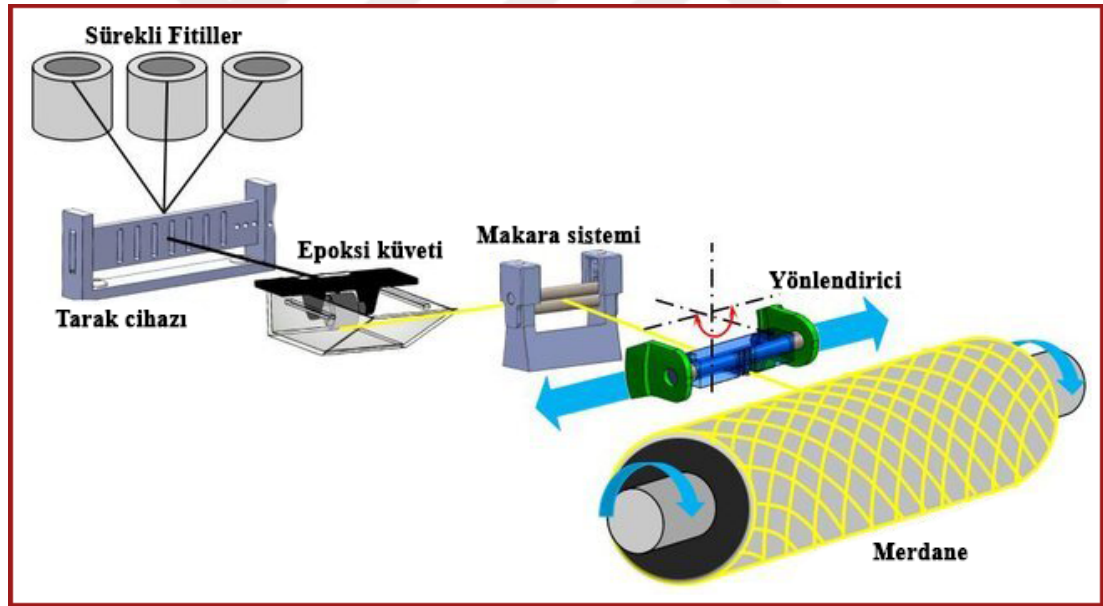
Püskürtme yöntemi çok çeşitli şekil ve boyutlarda tekneler, tanklar ve kaporta bileşenleri yapmaya uygunluğu açısından elle yatırmaya benzer bir yöntemdir. Bu yöntem el yatırması yönteminin biraz daha geliştirilmiş hali olarak düşünülebilir. Reçine ile lifin kalıp yüzeyine uygulama tarzı farklılık göstermektedir. El yatırması prosesi reçine ve takviye elemanları manüel olarak yapılırken bu proseste püskürtme tabancasının kullanılmasıyla emek yoğunluğu azalmaktadır. Şekil 2.10’da verildiği gibi kırılmış elyaflar kalıp yüzeyine, içine sertleştirici katılmış reçine ile birlikte özel bir tabanca ile püskürtülür. Püskürtme işlemi yüzeye dik olarak yapılmalı ve böylece malzeme israfı önlenmelidir. Püskürtme sonrası reçine içindeki havayı çıkarmak ve yüzeyi düzgünleştirmek amacıyla rulolama uygulanır [160].



Şekil 2.10. Püskürtme yöntemi ile kompozit üretimi[159].

2.4.3. Elyaf (Filament) Sarma Yöntemi

Elyaf sarma yöntemi sürekli elyaf iplerinin reçine ile ıslatıldıktan sonra bir makaradan çekilerek dönen bir kalıp (mandrel) üzerine sarılmasıdır. Sürekli elyaf iplerinin farklı açılarla kalıba sarılmasıyla farklı mekanik özelliklerde ürünler elde edilebilir. Şekil 2.11’de resimli açıklanan bu yöntem ile yüksek basınçlı kaplar, roket motoru kasaları, fırlatma tüpleri, oltalar ve golf sopası şaftları gibi genellikle silindirik ve boru şeklindeki nesneler üretilebilir. Gelişmiş yapısal verimlilik için yüksek mukavemetli fiberlerin verimli kullanımına izin vererek, fiberleri stres yoluna uyum sağlayan hassas bir modelde konumlandırmak için ucuz ve otomatik bir yöntemdir. Ayrıca seri üretim maliyeti daha da düşürebilir. Üretim bir mandrel üzerine elyaf sarılması şeklinde olduğundan iç yüzeyi pürüzsüz parçalar imal edilebilir. Polyester, epoksi ve silikon gibi reçineler kullanılabilir [161,162].

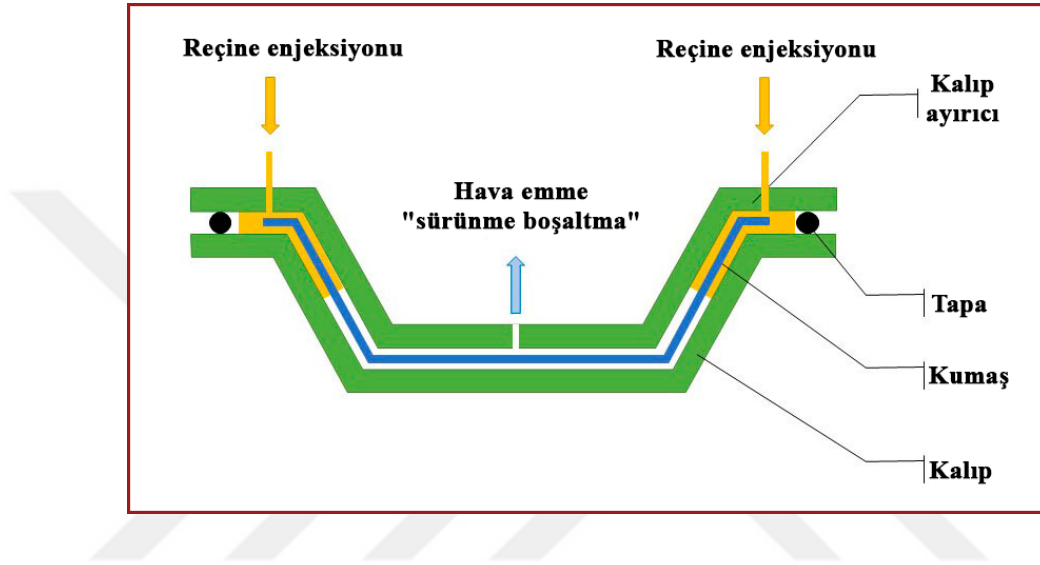


Şekil 2.11. Filament sarma yöntemi ile kompozit üretimi [163].

2.4.4. Reçine Transfer Kalıplama Yöntemi

Reçine transfer kalıplama (RTM), karmaşık şekillerdeki kompozit parçaların imalatında etkili bir yöntemdir. Ancak RTM prosesinin büyük parçalara uygulanmasındaki önemli sorunlardan biri takımlamadır. Büyük yapılar için kapalı kalıp yapmak zordur. Takviye malzemesi kuru olarak keçe, kumaş veya ikisinin

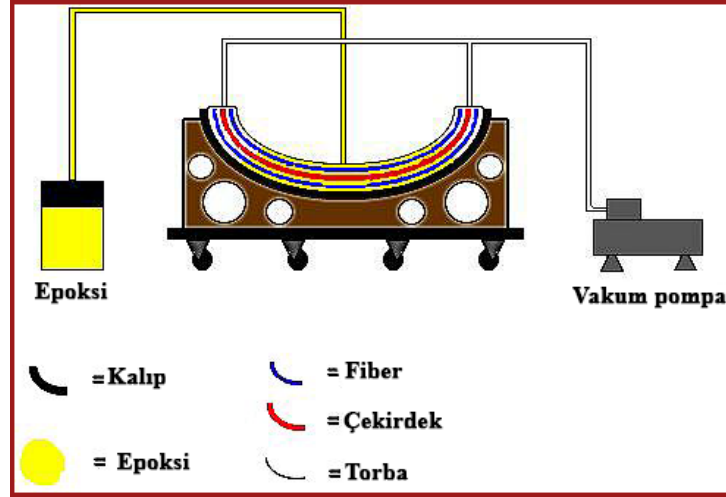
kombinasyonu kullanılır. Takviye malzemesi önceden kalıp boşluğu doldurulacak şekilde kalıba yerleştirilir ve kalıp kapatılır. Elyafar matris içinde geç çözünen reçinelerle kaplanarak kalıp içerisinde sürüklenmesi önlenir. Reçine basınç altında kalıba pompalanır. Bu süreç daha fazla zaman ister. Matris enjeksiyonu soğuk, ılık veya en çok 80 °C'ye kadar ısıtılmış kaplarda uygulanabilir [164,165]. Şekil 2.12'de görsel anlatımı verilmiştir.



Şekil 2.12. RTM yöntemi ile kompozit üretimi [166].

2.4.5. Vakum İnfüzyon Yöntemi

Vakum infüzyon prosesi (VİP), reçineyi laminatın içine sürmek için vakum basıncını kullanan bir tekniktir. Kuru malzemeler kalıba yerleştirilir ve reçine yerleştirilmeden önce vakum uygulanır. Tam bir vakum elde edildiğinde, reçine dikkatlice yerleştirilmiş boru sistemi aracılığıyla kelimenin tam anlamıyla laminatın içine emilir. Elyafın kalıba yerleştirilmesini gerektirmesinden dolayı uzun sayılabilecek bir işçilik gerektirir. Kalıp kapalı olduğu için ise zararlı gazlar azalır ve gözeneksi bir ürün elde edilebilir. Şekil 2.13'te verilen bu yöntemle karmaşık parçalar üretilebilir [167].

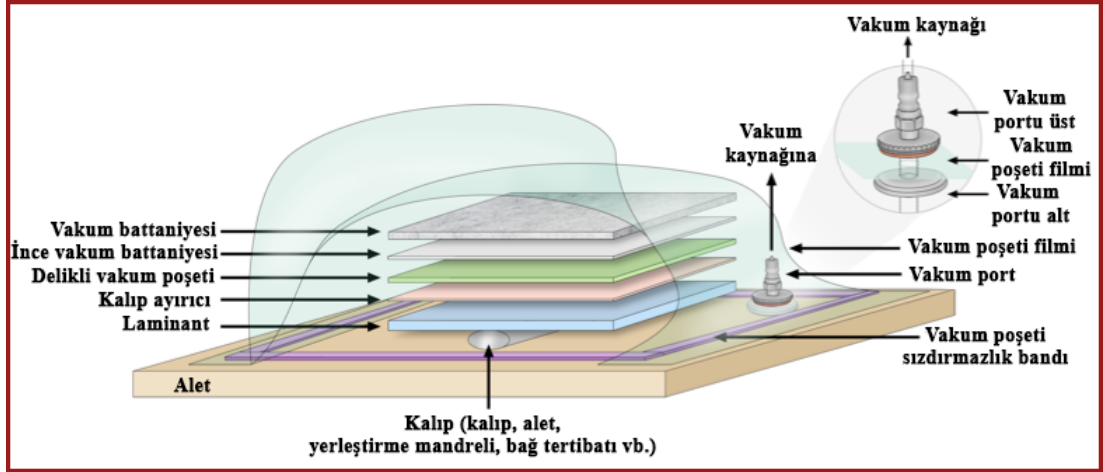


Şekil 2.13. VIP ile kompozit üretimi [168].

2.4.6. Vakum Torbolama Yöntemi (VBM)

Vakumlu torbalama yöntemi, yüksek performanslı ve büyük ölçekli elyaf takviyeli polimer parçaları düşük kalıp maliyetiyle üretebilen kapalı kalıp prosesidir. Vakum torbalama başlangıçta yüksek kaliteli ve büyük kompozit parçaların üretimi için geliştirildi. Şekil 2.14’te verilen VBM yöntemi, vakum altında takviyeler arasında hava boşlukları kalmadan ve reçinenin homojen dağılmasına yardımcı olduğundan benzersiz gereksinimleri karşılamaktadır. VBM yönteminin avantajları, esnek kalıp takım tasarımı ve kalıp malzemelerinin seçimi olup, büyük ve karmaşık kompozit parçaları iyi kalitede üretebilmektedir. VBM yöntemi, elle yatırma işleminin açık kalıbına benzer ve farklı parça geometrilerinin üretimi için kolaylıkla değiştirilebilir. Dezavantajları vakum torbası, akış dağıtım ortamı, soyma katmanı, sızdırmazlık bandı ve reçine tüpü yeniden kullanılamayabilir. Hava sızıntısı olasılığı yüksektir ve büyük ölçüde çalışanın becerisine ve deneyimine bağlıdır. Reçine enjeksiyon basıncı, ortam basıncı ile vakum arasında sınırlıdır.

VBM yönteminde ürünler oda sıcaklığında vakum etkisiyle sertleşebildiği gibi otoklav adı verilen özel basınçlı fırınların içerisinde de sertleşebilmektedir. Otoklavda uygulanan ısı, basınç ve vakum etkisiyle, minimum hava boşluğu içeren daha mukavemetli ve daha yüksek camsı geçiş sıcaklığına (T_g) sahip kompozit parçalar elde edilmektedir [169].



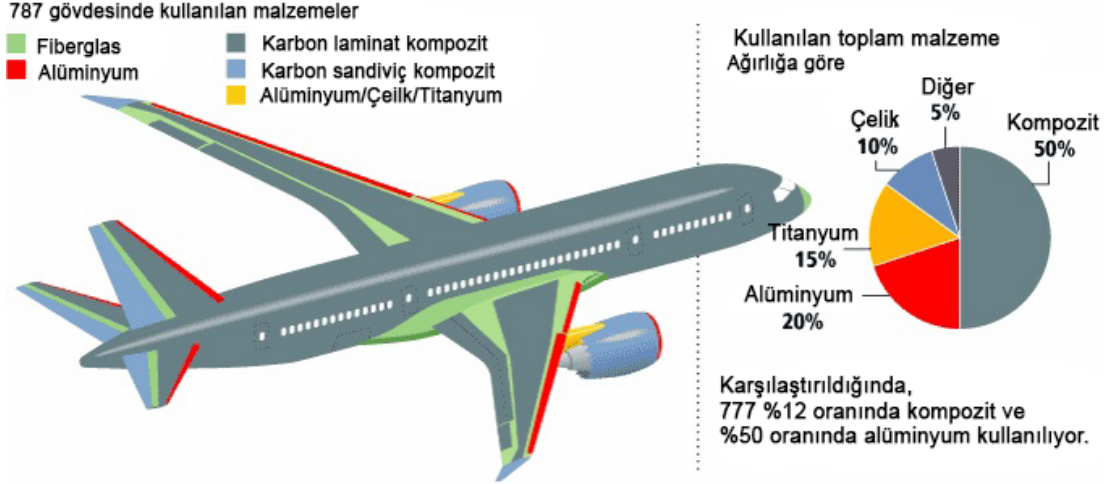
Şekil 2.14. VBM yöntemi ile kompozit üretimi [170].

2.5. HAVACILIKTA KOMPOZİT MALZEMELER

Havacılık endüstrisinde kompozit malzemeler yaygın olarak kullanılmaktadır ve mühendislerin malzemeleri ayrı ayrı kullanırken karşılaştıkları engelleri aşmalarına olanak sağlamıştır. Bileşen malzemeler kompozitlerdeki kimliklerini korur, birbirleriyle tamamen çözünmez veya başka bir şekilde birleşmez ve daha gelişmiş yapısal özelliklere sahip bir 'hibrit' malzeme oluşturur.

Hafif, yüksek sıcaklığa dayanıklı kompozit malzemelerin geliştirilmesi, yeni nesil yüksek performanslı, ekonomik uçak tasarımlarının hayata geçirilmesine olanak tanır. Bu tür malzemelerin kullanılması metal ve metal alaşımlarına göre yakıt tüketimini azaltır, verimliliği artırır ve uçakların doğrudan işletme maliyetlerini azaltır [115,171,172].

Airbus gelecekteki uçakların daha az bakım gerektiren, aktif olarak kontrol edilebilen ve çevre dostu olmaları amacıyla yüksek performanslı, sağlam, uygun maliyetli ve çok işlevli malzemelerin geliştirilmesi gerektiğini belirtmektedir. Bu hedefin bir göstergesi olarak son yıllarda Boeing B787 ve Airbus A350 uçaklarının yapısal parçalarının büyük çoğunluğu kompozit malzemelerden üretilmiştir [173,174]. Şekil 2.15'te B787 uçağında kullanılan kompozitler ve diğer malzemeler verilmiştir.

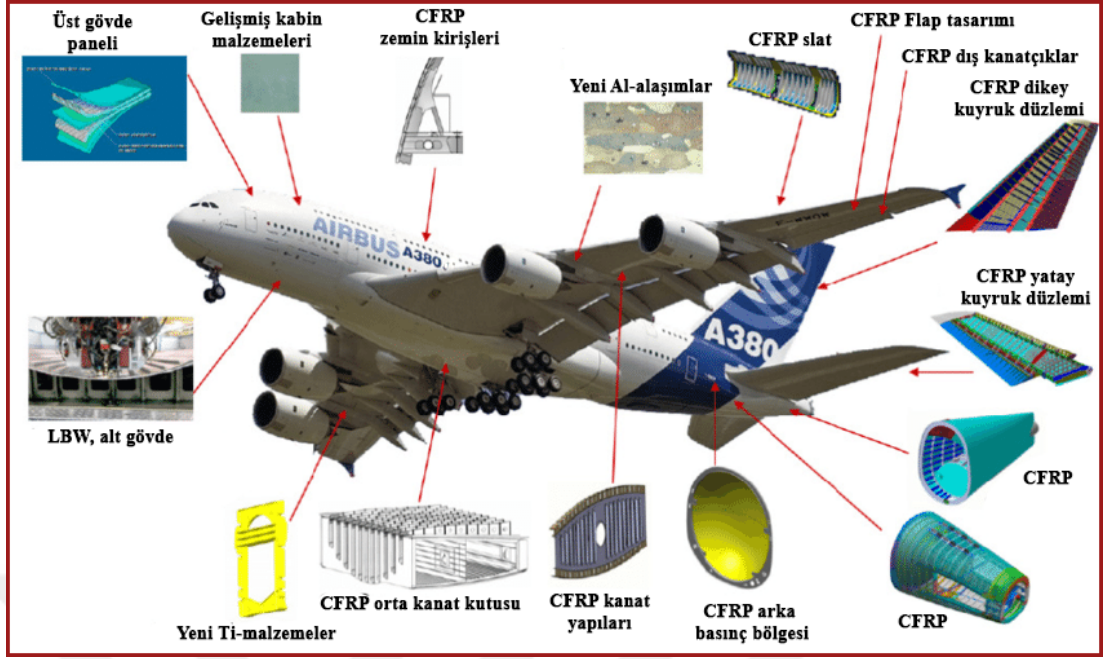


Şekil 2.15. B 787 uçak gövdesinde kullanılan malzemeler.

Cam fiber kumaş ilk kez 1950’lerde Boeing 707 yolcu jetinde kullanıldı ve yapının yaklaşık % 2’sini oluşturuyordu. Boeing tarafından üretilen her yeni nesil uçakta kompozit malzeme kullanım yüzdesi arttı; en yüksek oran ise B787 Dreamliner’da % 50 kompozit kullanımıdır.

Boeing 787 Dreamliner uçağı, ana yapısal elemanlarının alüminyum alaşımları yerine kompozit malzemelerden yapılan ilk ticari uçaktır. Bu uçakta eski cam elyaf kompozitlerden daha gelişmiş karbon elyaf ve karbon sandviç kompozitlere doğru bir geçiş oldu [148,175].

Her B787 uçağı, 23 ton karbon fiberden yapılmış yaklaşık 32.000 kg karbon fiber takviyeli polimer (CFRP) içerir. Karbon fiber kompozitler, geleneksel uçak malzemelerine göre daha yüksek bir güç-ağırlık oranına sahip oldukları için 787’nin daha hafif bir uçak olmasına yardımcı olur. Kompozitler gövde, kanatlar, kuyruk, kapılar ve iç kısımlarda kullanılır. Şekil 2.16’da verildiği üzere A380 uçağında gövde panelleri, pencere çerçeveleri, klipsleri ve kapılar CFRP’ den yapılmış olup, bu malzeme ve titanyumdan oluşan hibrit kapı çerçeve yapısı ilk kez kullanılıyor. Karbon fiber takviyeli kompozitlerin yüksek yüzdesi aynı zamanda daha geleneksel alüminyum jet uçaklarında gereken yorulmayla ilgili incelemelere olan ihtiyacı da azaltır ve korozyonla ilgili bakım kontrollerine olan gereksinimi azaltır [176–178].



Şekil 2.16. A 380 uçağında kullanılan CFRP malzemeler [179].

CFRP kompozitlerin daha çok tercih edilmesinde aşağıda verilen özellikleri etkili olmuştur:

1. Yüksek özgül mukavemet.
2. Yüksek sertlik ve düşük ağırlık.
3. Yüksek yorulma ve korozyon direnci.
4. Yüksek derecede optimizasyon yeteneği, yön mukavemeti ve sertliğinin uyarlanması.
5. Parça sayısını ve montaj sürelerini azaltarak büyük karmaşık şekilleri küçük çevrim süresinde kalıplama yeteneği.
6. Radar şeffaflığında düşük dielektrik kaybı olasılığı.
7. Düşük radar kesitine ulaşma imkânı [136].

2.6. HAVACILIKTA NANOKOMPOZİT MALZEMELER

Nanokompozit teknolojisinden ilk kez 1940 yılında Bower tarafından bahsedilmiştir. Bu teknoloji, alüminyum matris ve silisyum karbür (Al/SiC) nano parçacıkları ve alüminyum matris ve boron nitrit (Al/BN) kombinasyonundan oluşan takviye metal matris malzemesi içerisinde nanopartiküllerin süspansiyonundan oluşuyordu.

Hafifliğı, dayanıklılığı ve ucuzluğu vurgulayan mükemmel bir teknolojidir. Polimerlerin aksine nanokompozitler daha yüksek bir elektrik katsayısı sergilediler (~% 35 daha yüksek). Daha uzun servis ömrü ve yüksek hasar toleransı bu malzemeleri öne çıkarmaktadır.

Nanokompozitlerin havacılık endüstrisinde çeşitli alt sistemlere dahil edilmesi, özellikle nanokompozit polimerlerin kendi kendini iyileştirme özellikleri, nanoteknoloji endüstrisine olumlu bir bakış açısı kazandırmaktadır. Sürdürülebilir etkilerin iç içe geçmiş doğası ve teknolojideki sürekli gelişme, nanokompozitleri havacılık ve uzay uygulamaları için ideal bir teknoloji haline getirmektedir. Nanokompozitler karmaşık havacılık geometrilerine entegre edilebilir ve üretim tekniklerinde atık oluşumunu azaltabilir. Bu, hafif ve az bakım gerektiren gövde ve yapıların tasarımı için kullanılabilir [180].

Uçak üreticileri ağırlık ve maliyetin azaltılması, yapısal ve fonksiyonel performansın iyileştirilmesi amacıyla Ar-Ge birimlerinde nano malzeme araştırma ekipleri kurmuştur [181]. Havacılık endüstrisinde önceden var olan sorunları çözmeyi amaçlayan araştırma-geliştirme (Ar-Ge) aşamasındaki nano katkılardan bazıları aşağıda verilmiştir. Şekil 2.17’de aşağıda verilen nano katkılarının uçak üzerinde kullanılması hedeflenen kısımlar verilmiştir.

Saf Grafen (PG) [81]

Grafen nano platelet (GNP) [182]

Grafen oksit (GO) [81]

Tek cidarlı karbon nanotüp (CNT) [25]

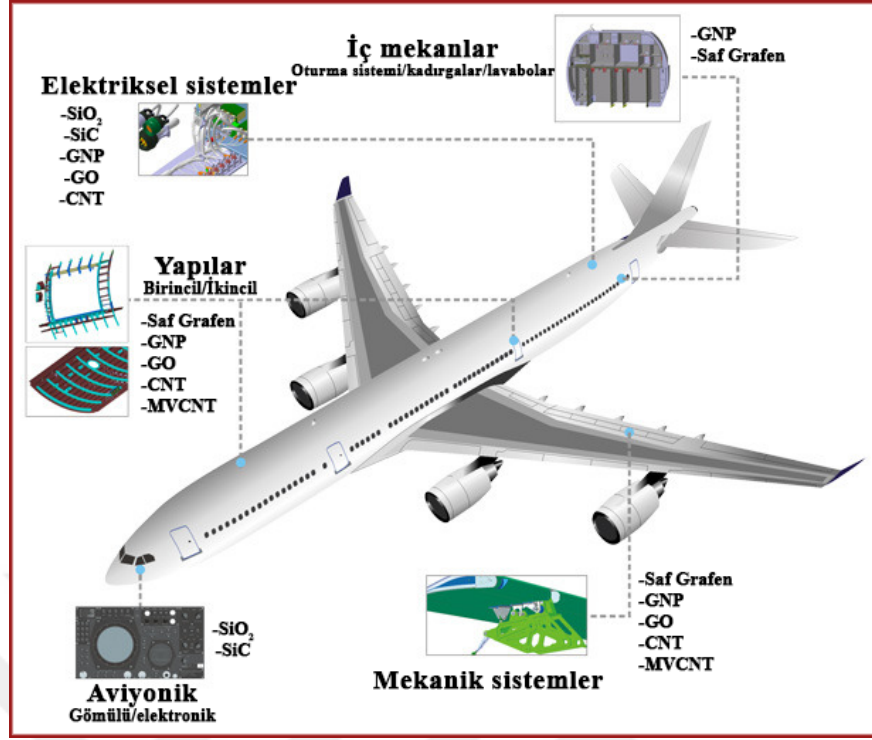
Çok cidarlı karbon nanotüp (MVCNT) [183]

Karbon nano fiber (CNF) [28]

Silyum Dioksit (SiO₂) [184]

Silisyum Karbür (SiC) [184]

Bu nanoparçacıklar metal matris, seramik matris ve polimer matris ile ayrı ayrı kullanılabilirler [185].



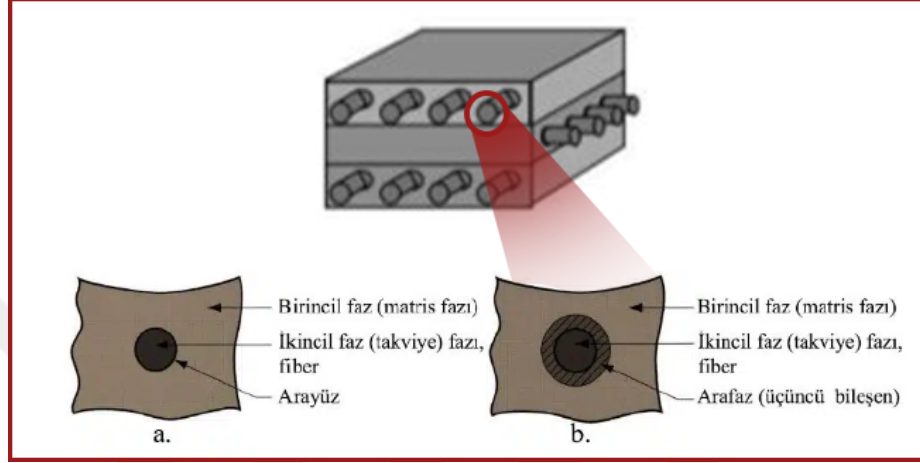
Şekil 2.17. Uçaklarda nano katkı kullanılması hedeflenen kısımlar [186].

2.6.1. Elyaf Takviyeli Polimer (FRP) Nanokompozitler

Uçaklar Faraday kafesi prensibiyle elektriksel olarak iletken metaller ile kaplanmış veya iletken bir ağ örtüsü biçiminde örülmüştür. Uçak yapısalındaki bu örtü, iç hacmi dış ortamdaki elektrik alanlardan koruyan bir muhafaza şeklindedir ve uçuş emniyetini sağlamaktadır. Kompozit malzemelerin uçak yapısal parçalarında kullanımı bu durumdan dolayı zorluklar içermektedir. Metalik olmayan kompozit malzemelerin uçak yapısal malzemesi olarak gövdede kullanımı, yalıtkan olması sebebiyle önemli bir dezavantajdır. Polimer matrisli kompozit malzemelere çeşitli uygulamalar yapılarak elektriksel iletkenlik kazandırılması hedeflenmektedir.

Arayüzeyi güçlendiren GNP ve MWCNT arafazları düşük yoğunluk ve kolay karışabilir yapıları, mekanik, elektrik ve termal özelliklerin sebebiyle havacılık sektöründe ilgi odağı haline gelmişlerdir [187]. Şekil 2.18’de verilen resimde fiber, matris ve arafazın arayüzeydeki etkisi gösterilmiştir.

GNP ve MWCNT gibi nano ölçekli dolgular, olağanüstü mekanik, elektriksel ve termal özelliklere sahip düşük ağırlıklı kompozitler için yeni olanaklar sunuyor. Yüksek elastisite modülü, geniş yüzey alanı, mükemmel termal ve elektriksel özellikleri göz önüne alındığında bu dolgular ileri mekanik özelliklere yol açan fiberle güçlendirilmiş kompozitlerin polimer matrisleri için değiştiriciler olarak kullanılabilir.



Şekil 2.18. Fiber-matris fazları ve arayüz (a) ve üçüncü bileşen arafaz (b) [188].

Bununla birlikte GNP veya MWCNT ile güçlendirilmiş polimer matrisli kompozitlerde yalnızca orta derecede bir mukavemet artışı olur, bu durum teorik olarak tahmin edilen potansiyelin önemli ölçüde altındadır. Nanoparçacıkların kabiliyetlerinden yeterince faydalanmak için nano katkıların polimer matris içindeki homojen dağılımı ve nano katkı ile polimer matrisi arasındaki güçlü arayüzey bağı kritik iki konudur [189]. GNP'nin veya MWCNT'nin epoksi matrisinde topaklanmasını veya yığılmasını önlemek ancak bu nano katkıların yüzeylerinin fonksiyonlaştırılması ile mümkündür. Yüzey fonksiyonlaştırma işlemi yüzey aktif madde olarak bilinen sürfaktanlar ile yapılır.

2.6.2. Sürfaktan

Sürfaktanlar çözeltilerde dinamik yüzey gerilimini sağlayarak homojen bir dağılım elde edilmesine yardımcı olurlar [52]. Hidrofobik (suyu sevmeyen) bir baş ve hidrofilik (suyu seven) bir kuyruktan oluşan amfipatik maddelerdir. Molekül başına birkaç bağlayıcı gruba sahip monomerik sürfaktanlar ve molekül başına birçok

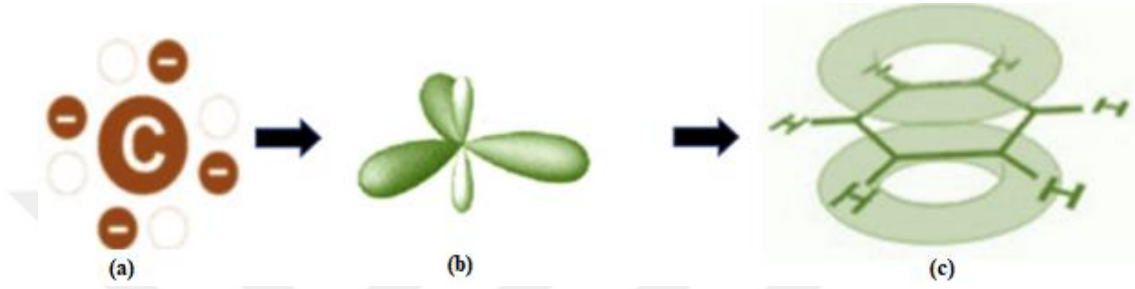
bağlayıcı gruba sahip polimerik sürfaktanlar şeklinde sınıflandırılır. Ayrıca hidrofobik başın taşıdığı elektrik yüküne göre pozitif yük taşıyanlar katyonik, negatif yük taşıyanlar iyonik, hem pozitif hem de negatif yük taşıyanlar amfoterik ve hiç yük taşımayanlar iyonik olmayan olarak sınıflandırılır. İyonik sürfaktanlar düşük üretim maliyeti, iyi dağılım, yüksek ıslatabilirlik ve dinamik yüzey gerilimi sağlayabilen en iyi sürfaktanlardır [53,54].

Karbon allotropu olan GNP veya MWCNT etil alkol (EtOH) ile karıştırıldığında bir süre sonra dibe çökerler ve etil alkol üstte kalır. EtOH ile birbiri içerisinde karışmayan karbon allotropları sürfaktanların yardımıyla birleşerek emülsiyon oluşur. Sürfaktanlar emülsiyonları iki mekanizma ile stabilize ederler. Birincisi GNP/MWCNT ve etil alkol arasındaki arayüzey gerilimini azaltırlar. GNP/MWCNT ve etil alkol karışıp GNP/MWCNT öbekleri oluştuğunda emülsiyonun arayüzey alanında kayda değer bir artış olur. Sürfaktan katkısıyla, arayüzey alanın oluşturacağı serbest enerjide önemli bir artış olmaz. İkincisi ise sürfaktanlar, GNP/MWCNT öbekleri ile ana faz arasında hacimsel, elektriksel ve mekanik bir bariyer oluşturarak bu öbeklerin birleşmesini azaltacaktır. Sürfaktanlar GNP/MWCNT nano katkısının etrafını sararak veya etrafında bir misel oluşturarak yeniden yığılmayı önler [53,54,67].

GNP'lerin karbon atomları (C-C) arasındaki zayıf van der Waals bağlarını kırmak [56] ve sürfaktanı kritik misel konsantrasyonuna (CMC) göre eklemek çok önemlidir [57]. Anyonik, katyonik ve iyonik olmayan sürfaktanlar arasında GNP yüzeyinin 0,011 mg/ml gibi çok düşük Sodyum Dodesil Sülfat (SDS) konsantrasyonunda bile stabilize edilebildiğini ve SDS konsantrasyonu CMC'ye kadar arttırıldığında çözeltiyi dağıtma yeteneği de artmaktadır [58]. Kısa kuyruğu ve küçük baş yapısı nedeniyle SDS, sürfaktan molekül grupları arasındaki itme etkileşimlerini azaltarak diğer sürfaktanlara göre daha iyi bir dağılım sağlar [59,60]. Ayrıca SDS miktarının CMC'ye kadar arttırılmasıyla agregasyon önlenmektedir [61,62]. Dinamik yüzey geriliminin [63,64] zamanla azalmaması ve kendi kendine topaklanmanın meydana gelmemesi için CMC'ye [65,66] göre SDS sürfaktan maddesinin eklenmesi gerekir. SDS konsantrasyonu CMC'den düşükse π - π agregasyonuna, daha yüksekse grafenin oksitlenmesine neden olur [64].

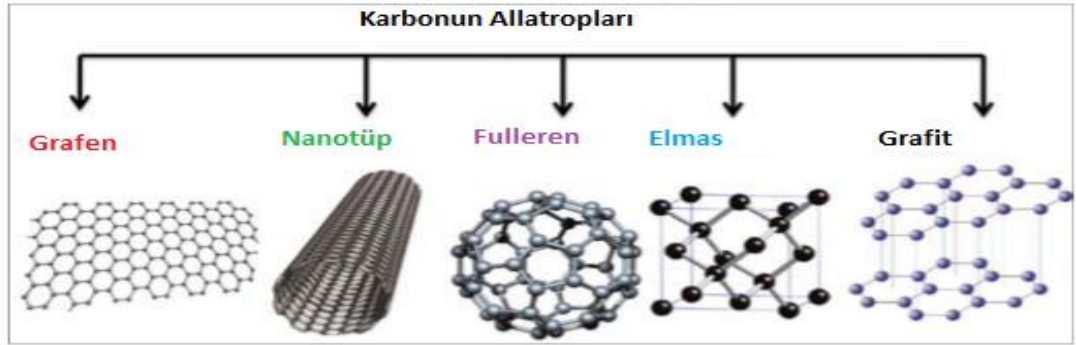
2.6.3. Grafen

Karbon C ile gösterilen atom ağırlığı 12,011 g/mol olan 6 elektronlu maddedir ve periyodik tabloda 4A grubunda yer almaktadır. Karbon atomları sadece kendi aralarında kovalent bağla bağlanıp, elektron sayısına göre 3 farklı şekilde (sp , sp^2 , sp^3) [190] bağlanma gösterirler. Şekil 2.19’da karbon atomu, yörüngesi ve bağları verilmiştir.

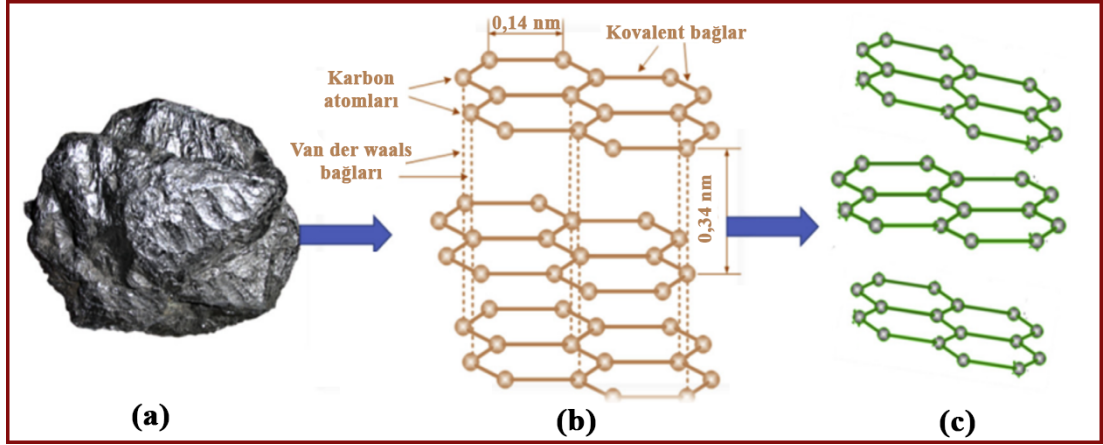


Şekil 2.19. Karbon atomu (a), karbon atomu yörüngesi (b) ve karbon atomu bağları (c) [191].

Şekil 2.20’de verilen karbonun farklı allotroplarından olan fulleren 0 boyutlu (0B), karbon nanotüpler 1 boyutlu (1B), grafen 2 boyutlu (2B) ve elmas ve grafit 3 boyutlu (3B)’ dur [192].



Şekil 2.20. Karbonun allotropları [184].



Şekil 2.21. Grafit (a), grafit şematığı (b) ve grafen şematığı (c) [193].

Saf grafen, orijinal, saf, oksitlenmemiş formundaki grafendir; oksitlenmiş muadilinden daha üstün özelliklere sahiptir, ancak saf grafenin elde edilmesi kolay değildir ve bol miktarda bulunmaması, grafen bazlı işlevsel cihazların gelişimini engellemiştir [190]. Şekil 2.21’de grafitten grafen elde edilmesi ve atomları arasındaki bağlar verilmiştir. Grafenin farklı bağlarla veya farklı kimyasal süreçlerle oluşan Şekil 2.22’de verilen birçok grafen bazlı nano katkı mevcuttur. Grafen bazlı karbon allotroplarının fiziksel özellikleri çizelge 2.2’de verilmiştir.

2.6.4. Grafen Oksit

Grafen oksit (GO), epoksit, karbonil, karboksil ve hidroksil grupları gibi çeşitli oksijen içeren işlevselliklere sahip tek bir monomoleküler grafit tabakası olarak görülebilen benzersiz bir malzemedir. İndirgenmiş GO (rGO) tabakaları genellikle kimyasal olarak türetilmiş bir grafen türü olarak kabul edilir, fonksiyonlaştırılmış GO veya rGO olarak bilinir [194].

2.6.5. Grafen Nanoplatelet (GNP)

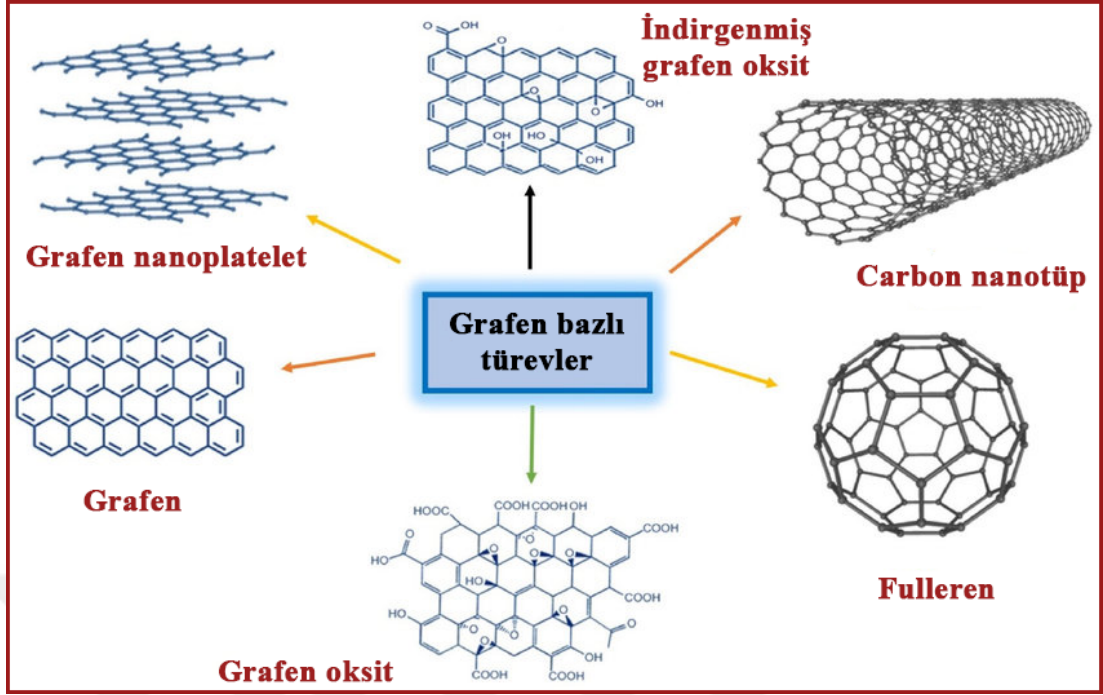
Grafen nanoplatelet (GNP), altıgen bir kafes içinde düzenlenmiş tek atom kalınlığında bir karbon atomu tabakası olan bir ile birkaç grafen katmanından oluşan 100 nm’den daha küçük bir nanometre boyutuna sahip (002) düzlemi boyunca van der Waals kuvvetleriyle bağlanarak istiflenen [195] yüksek yüzey alanı, yüksek elektrik

iletkenliği, yüksek termal iletkenliği ve yüksek mukavemet özelliği olan iki boyutlu (2B) nano ölçekli trombosit şekilli parçacıklardır [43]. GNP büyük ölçekli üretimi ve düşük maliyetleri olağanüstü fiziksel özelliklerle birleştirir [196]. Tipik olarak GNP sentezlemek için toplu grafitin mikromekanik bölünmesi kullanılır ve yalnızca grafit yığınlarıyla karıştırılmış bir miktarda grafen pullarının elektro sentezlemesiyle elde edilir.

Grafit, karbon nanotüpler ve fullerenler gibi grafen ve grafen bazlı malzemeler apolar sistemlerde su hidrasyonunun grafen yüzeylerinin çekiciliğine karşı itici katkısından dolayı hidrofobik kabul edilirler [197] Temas açısı 90°'den büyük yüzeyler hidrofobiktir. Bu tür yüzeyler üzerinde su damlacıkları yayılmaz, damlacık şeklinde kalır ve suyu sevmeyen olarak bilinirler. Temas açısı 90°'den küçük yüzeyler hidrofiliktir. Bu tür yüzeyler üzerinde su homojen şekilde yayılır, damlacık şeklinde kalmaz ve suyu seven olarak bilinirler [198].

2.6.6. Karbon Nanotüp

Karbon Nanotüp, karbon elementinin uzunluk-çap oranı $28 \times 10^6:1$ olan allotropu. Bu oran başka herhangi bir malzemenin sahip olabileceğinden daha büyüktür. Tek cidarlı (CNT) ya da çok cidarlı (MWCNT) karbon nanotüpler mevcuttur. Karbon nanotüplerin yapısını açıklayabilecek en basit model tek duvarlı bir tüp için şu şekildedir: Tek sıra karbon atomundan oluşan bir grafen katmanının, silindir şeklinde bükülerek uçlarının birleştirildiği ve grafen içerisindeki bağların aynısından oluşturulduğu düşünülürse bu yapı tek duvarlı bir karbon nanotüple aynı yapı olur.



Şekil 2.22. Grafen bazlı nano katkıları [199].

Çizelge 2.2. Karbon allotroplarının özellikleri [200].

Özellik	Grafen	Karbon nanotüp	Grafit	Fulleren
Yüzey alanı (m ² /g)	2630	1315	10	5
Termal iletkenlik (W/m·K)	5000	>3000 (MWCNT)	3000	0,4
Serbestlik (cm ² /Vs)	200,000	100,000	13,000	0,56
Elastisite modülü (TPa)	1	0,4	1,06	0,01
Optik geçirgenlik (%)	97,7	-	-	-

BÖLÜM 3

MALZEMELERİN KARAKTERİZASYONU

3.1. KİMYASAL KARAKTERİZASYON

3.1.1. Ultraviyole ve Görünür (UV-Vis) Spektroskopisi

Bir ışın demetinin bir örnekten geçtikten veya bir örnek yüzeyinden yansıtıldıktan sonraki azalmasının ölçülmesidir. Işığın şiddetinin azalması absorplamanın arttığını gösterir. UV-Vis spektroskopisi genellikle çözeltideki moleküller veya inorganik iyon ve komplekslerin ölçümünde kullanılır. Birçok molekül UV veya Vis dalga boylarını absorplar ve farklı moleküller farklı dalga boylarını absorplarlar [192].

UV-Vis Analizi ile epoksi matrisinde FGNP'nin ve FMWCNT'nin absorpsiyonu incelenmiştir. FGNP'nin bileşimini daha fazla tanımlamak için 250 ila 800 nm aralığında Perkin-Elmer Shimadzu 1800 UV-Vis spektrofotometresi kullanılarak ölçüldü. Sonikasyondan sonra, epoksi süspansiyonları, ölçümler sırasında tespit edilebilir bir iletim elde etmek için 0,05 mg/ml'lik bir konsantrasyona kadar etil alkol ile seyreltili.

3.1.2. Fourier Dönüşüm (FT-IR) Spektroskopisi

Kızılötesi (IR) Spektroskopisi temel olarak kızılötesi ışığın incelenen madde tarafından soğurulmasına dayanır. Soğurulma, moleküldeki bağların titreşimi ve dönüşleri için gerekli miktarda dalga enerjisinin, cihaz tarafından elektromanyetik spektrumun kızılötesi bölgesinden gönderilmesiyle gerçekleşir. Literatürde grafenin yapışma etkileşimlerinin araştırılmasında kullanılmıştır [201].

FT-IR analizi ile nanokompozitlerde FGNP'nin ve FMWCNT'nin yapışma etkileşimleri incelenmiştir. Nanokompozitin FT-IR analizi Bruker Alpha-P modeli olan FT-IR spektrofotometresinde OPUS yazılımı ile oda sıcaklığında gerçekleştirildi. 250 ile 4000 cm^{-1} arasında dalga boyunda geçirgenlik yöntemi kullanıldı.

3.2. TERMAL KARAKTERİZASYON

3.2.1. Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC)

DSC yöntemi kontrol edilen akış hızındaki bir pörc gazı altında deneğin kontrollü olarak ısıtılması veya soğutulmasıyla yapılır. Deney boyunca uygun bir sensörle referans bir malzeme ile test malzemesi arasındaki, enerji değişikliği nedeniyle oluşan, ısı giriş farkı izlenir. Böylelikle termal kararlılık ve camsı geçiş sıcaklığı (T_g) ölçülür. (T_g : Bir kompozit ısıtıldığında camsı geçiş sıcaklığı adı verilen bir sıcaklıkta yumuşar ve kauçuksu özellik göstermesidir) [202].

FGNP'nin ve FMWCNT'nin kütleme süreci üzerindeki olası etkileri ve termografik muayene yapmak için ısıtılacak maksimum değerleri değerlendirebilmek için DSC ölçümleri yapılmıştır. Malzemelerin DSC ölçümleri PYRS yazılımlı Perkin Elmer Jade DSC cihazı ile 3 bar nitrojen gazı basıncında ve 30°C ila 200°C sıcaklık aralığında yapıldı. Erime noktalarını ve erime entalpilerini analiz etmek için yeni numuneler öncelikle oda sıcaklığından 450 °C'ye ısıtıldı ve bu sıcaklıkta 10 dakika boyunca izotermal olarak tutuldu. Tüm termogramlar 10°C/dakika hızında kaydedildi. Tüm DSC deneyleri kopyalandı; termogramlar son ısıtmayı ifade eder.

3.2.2. Termogravimetrik Analiz (TGA)

Termogravimetrik analiz, malzemelerde sıcaklığın veya zamanın bir fonksiyonu olarak meydana gelen kütle kaybı ve/veya kazanımlarının belirlenmesinde kullanılan bir yöntemdir. Bunun yanında numunenin, uygun bir sabit sıcaklıkta, belli bir zaman aralığında kütle değişimi zamanın bir fonksiyonu şeklinde ölçülüp kaydedilir. Genel olarak, deney numunesinin kütlesinin değişmesine neden olan reaksiyonlar; bozunma

veya yükseltgenme reaksiyonları veya bir bileşenin buharlaşmasıdır. Kütlenin zamana veya sıcaklığa karşı çizilen grafiği T_g eğrisidir [203].

Sentezlenen nanokompozitlerin termogravimetrik analizi (TGA) ve diferansiyel taramalı kalorimetrisi (DSC), termal direncini ve ayrışma sıcaklığını değerlendirmek ve termal geçişlere karşılık gelen sıcaklıkları belirlemek için yapıldı. TGA analizinde 16 mg numune 1000 °C'ye kadar atmosferik ortamda 10 °C/dakika ısıtma hızıyla ölçülmüştür.

3.3. ELEKTRİKSEL KARAKTERİZASYON

3.3.1. Empedans Spektroskopisi

Empedans, bir alternatif akımın (AC) akışına karşı olan direncin ölçüsüdür. Empedans spektroskopisi, elektrokimya, malzeme bilimi, biyoloji ve tıp, yarı-iletken endüstrisi ve sensörler gibi birçok uygulama alanında kullanılan güçlü bir ölçüm yöntemidir. Kompleks empedansı çeşitli frekanslarda kullanmak, bir ölçüm sırasında elde edilebilecek bilgi temelini artırır. Bir ölçüme katkıda bulunan farklı etkilerin birbirinden ayırt edilmesine yardımcı olur ve ileri matematiksel yöntemlerle birlikte, erişilebilir olmayan nicelikler hesaplanabilir [204].

Bu çalışmada Thermo Scientific SL-16R empedans spektroskopisi ile 20 °C ile 120 °C sıcaklık aralığında farklı frekanslarda dielektrik analizi yapılarak nano katkıların elektrik iletkenliği üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

3.3.2. İki Prop Elektrik İletkenlik Testi

Numunenin ön ve arka tarafları arasındaki hacimde toplu iletkenlik ölçümleri yapıldı. Burada -0,03 V'den 0,03 V'a kadar 0,0001 V aralıklarla ölçümler alındı ve bu ölçümün verileri çizildi. Bu işlem için temas alanları ölçüldü. Bu nedenle grafiğin düşey eksenleri $A \text{ cm}^2$ cinsindendir. Ayrıca direnç değeri akım-voltaj (I-V) ölçümleri kullanılarak hesaplandı. Dört numunenin katkı oranına bağlı olarak direnç değişimi test edildi. Yüzey direnci için tüm işlemler tekrarlandı. Yüzey direncinde numunelerin

parlak yüzeyi alınarak elektriksel kontaklar yapılmış ve kontaklar arası mesafe 1 cm olarak ayarlanmıştır. Ölçümler numunelerin parlak yüzeyine gümüş macun sürülerek ucunda grafit 88 maddesi bulunan prob kullanılarak Keithley SCS 4200 yarı iletkenlik test cihazı kullanılarak oda sıcaklığında ve % 53 nem ortamında yapıldı.

3.4. MORFOLOJİK KARAKTERİZASYON

3.4.1. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)

Test malzemesine odaklanarak bir elektron demeti ile test edilecek malzemenin yüzeyini tarayıp iki boyutlu görüntüye çeviren elektron mikroskobudur. Elektronlar test malzemesindeki atomlarla etkileşim kurarak test malzemesinin yüzey morfolojisi, topografyası ve malzeme oluşumu hakkında veriler bulunduran farklı sinyaller üretir. Bu sinyaller sensörler tarafından toplanıp bilgisayar ekranına aktarılır ve görüntü elde edilir [205].

TESCAN /MAIA3 XMU SEM cihazı ile elde edilen görüntülerinde grafenin matris içindeki dağılımı ve takviye ile etkilişimi bilgisini vermiştir.

3.5. MEKANİK KARAKTERİZASYON

3.5.1. Çekme Testi

Çekme testi, bir numunenin kopuncaya kadar bir ekseninde çekme kuvvetlerine maruz bırakılmasıyla yapılan temel bir malzeme bilimi testidir. Çekme testinin çıktıları herhangi bir uygulama için kalite kontrol, malzeme seçimi ve malzemenin farklı kuvvetler altında davranış biçimini tahmin etmek için kullanılır. Çekme testi sonuçlarına göre elde edilen bilgiler; maksimum uzama, alandaki azalma ve maksimum çekme gerilmesidir. Ayrıca elde edilen verilerden Poisson oranı, akma mukavemeti ve malzemenin elastisite modülü katsayısı gibi karakteristikleri elde edilebilir [206].

Çekme testi EN ISO 6892-1 standartlarına göre oda sıcaklığında yapılmıştır. Numuneler I tipi olarak kompozit kesme makinasında 100mm boy x 10mm en x 2mm kalınlık ölçülerinde kompozit kesme makinası kullanılarak elde edilmiştir, grafen katkılı numunelerin çekme gerilmesi ve mukavemetleri test edilmiştir.

3.5.2. Darbe Testi

Charpy darbe testi, standart çentikli bir numunenin darbe yükü altında kırılırken emdiği enerjiyi ölçer. Bu test, metaller, kompozitler, seramikler ve polimerler gibi mühendislik malzemelerinin çentik hassasiyetini ve darbe dayanıklılığını belirlemek için ekonomik bir kalite kontrol yöntemi olarak kullanılmaya devam etmektedir [207]. Darbe testi DIN EN 10045 standartlarına göre oda sıcaklığında yapılmıştır. Numuneler I tipi olarak kompozit kesme makinasında 55mm boy x 10mm en x 2mm kalınlık ölçülerinde kompozit kesme makinası kullanılarak elde edilmiştir, grafen katkılı numunelerin mukavemeti test edilmiştir. Ayrıca 55mm boy x 10mm en x 2mm kalınlık ölçülerinde hazırlanan numunelere ağırlık düşürme darbe testi yapılmıştır.

3.5.3. Sertlik Testi

Sertlik, kompozitlerin sürtünme kuvvetine, kesilmeye, çizilmeye ve plastik deformasyona karşı gösterdiği direnç olarak açıklanabilir. Mühendislik terminolojisinde ise malzemelerin dislokasyon hareketine karşı gösterdiği direnç olarak açıklanır. Vickers sertlik testi Zwickroell cihazında HV3 skalası ile yapıldı. Devotrans cihazında ASTM D224 standartlarına göre oda sıcaklığında D skalası ile shore sertlik testi yapılmıştır.

3.6. HASARSIZ KONTROL YÖNTEMLERİ İLE DEĞERLENDİRME

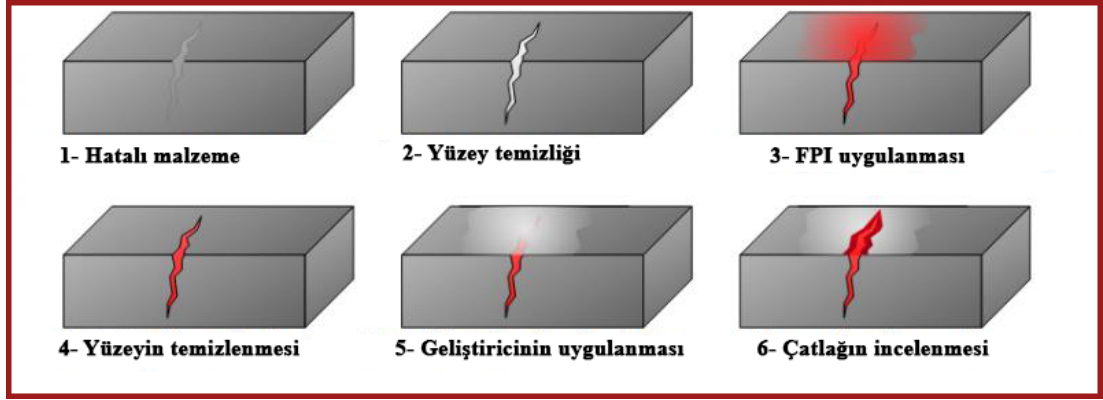
Hasarsız kontrol yöntemleri, malzemelerin oluşumu, geometrisi, üretimde veya kullanımda oluşan yüzey veya yüzey altı hataları hakkında bilgi edinmek amacıyla, malzemenin bütünlüğüne ve görevsel özelliklerine zarar verecek herhangi bir tahribat oluşturmada uygulanır. Hava aracı yapılarının, emniyetli, güvenilir ve dayanıklı bir şekilde servise devam edebilmesi ancak bakım esnasında hasarsız kontrol

yöntemlerinin uygulanabilmesi ile mümkün olmaktadır. Hasarsız kontrol teknolojilerinin havacılık endüstrisinde uygulanması ile ekonomik fayda sağlanmaktadır. Gelişen hava aracı üretim ve bakım teknolojileri, hasarsız kontrol prosedürlerinin de bu gelişim ile senkronize olarak ilerlemesini gerektirmektedir. Hava aracı bakım ve kontrollerinde yaygın kullanım alanına sahip olan hasarsız kontrol teknolojilerindeki gelişmelerin izlenmesi ve uygulanması, bu nedenle büyük bir önem taşımaktadır [208–210]. Günümüzde malzeme kontrolünde birçok hasarsız kontrol yöntemi kullanılmaktadır, ancak havacılık sektöründe yaygın olarak gözle kontrol yöntemi, floresan penetrant yöntemi, manyetik parçacık yöntemi, radyografi – X yöntemi, ultrasonik yöntem, eddy akımları yöntemi ve termografik yöntem kullanılmaktadır.

3.6.1. Floresan Penetrant Yöntemi (FPI)

Floresan penetrant yöntemi ile yüzeydeki veya yüzeye oldukça yakın olan yüzey altı hatalar tespit edilebilir. Kompozit malzemeler haricindeki bütün malzemelerin kontrollerinde uygulanabilir [211]. Şekil 3.1’de verildiği gibi temiz, kuru ve pürüzsüz yüzeye uygulanan açık yeşil regindeki penetrant sıvısı yüzey/yüzeyaltı süreksizliğine nüfuz eder akabinde penetrantı belirginleştirmek için “developer” adı verilen geliştirici sıvı püskürtülür ve kaba fazla sıvı yüzeyden temizlendikten sonra mor ötesi ışık altında kontrol sağlanır. İşlem 4 °C ile 52 °C aralığında yapılabilir [212].

Ağırlık düşürme darbe testi sonrası FGNP nano katkısının oluşturduğu hasarları incelemek için FPI testleri THY TEKNİK A.Ş. tahribatsız muayene atölyesinden destek alınarak tamamlandı. Hassas malzeme FPI kontrol prosedürü gereği 24 °C sıcaklığında seviye 3 tip 1 metod D 2L27A penetrant kullanıldı. Malzemelere penetrant uyguladıktan sonra penetrantın çatlaklara nüfuz etmesi için 30 dk. beklendi ardından hatalara rahat odaklanabilmek ve atık penetrantın giderilmesi için 1. yıkama ve emülgatör uygulandı ve 1 dakika sonra 2. yıkama yapıldı ve 70 °C sıcaklıkta fırında 30 dakika kurutma işlemi yapıldı. Çatlakların belirginleşmesi için Magnaflux Spotcheck SKD-S2 geliştirici uygulandı ve karanlık odada mor ötesi ışık altında kontroller sağlandı.



Şekil 3.1. FPI yöntemi ile yüzey hatalarının kontrolü.

3.6.2. Termografi Yöntemi

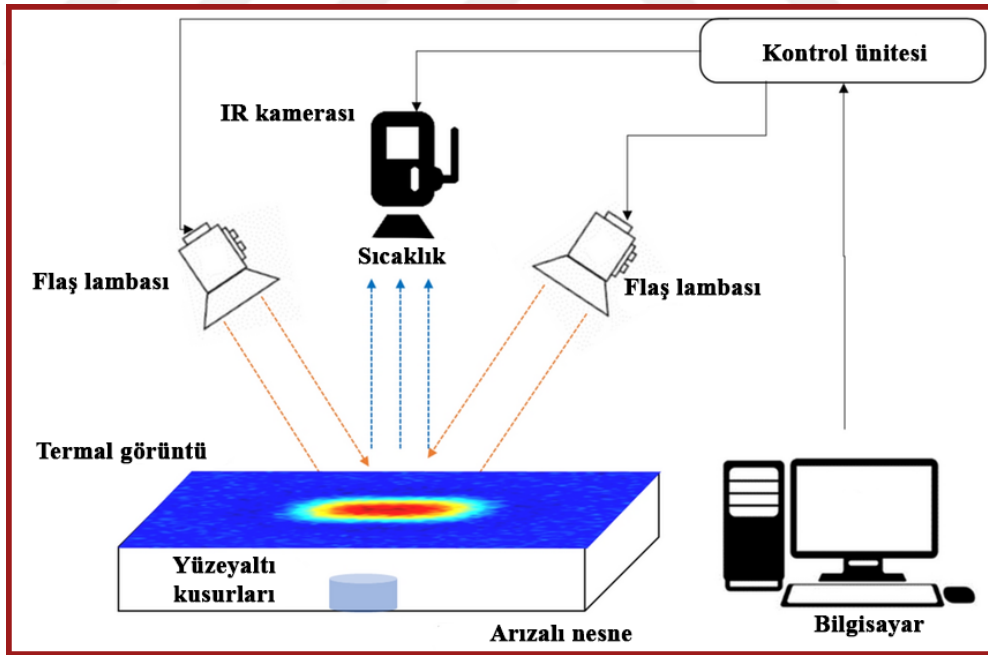
Kızılötesi (IR) termografik muayene yöntemi malzemeye hasar vermeden yüzey veya yüzey altındaki süreksizliklerin sıcaklık değişiminden (ısıtılarak veya soğutularak) faydalanarak oluşan hasarın termal kameralar yardımıyla temassız bir şekilde görünür ışıktan daha uzun dalga boyuna sahip elektromanyetik radyasyon olan kızılötesi ile morötesi renk aralığında görüntülenmesidir. Kontrolde kullanılan termal kameralar malzemenin yaydığı radyasyonu yakalar ve elektrik sinyaline dönüştürür ve elde edilen görüntüler, her kızılötesi enerji seviyesine bir renk atanarak görünür görüntülere dönüştürülür. Sonuç olarak termal kamera ekranında “termogram” adı verilen iki boyutlu renkli bir görüntü ortaya çıkar [111,213].

Şekil 3.2’de verildiği gibi yüksek güçte lambalar veya ısıtıcılar ile malzeme ısıtılır, malzeme içerisinde süreksizlik var ise ısı dalgaları bu bölgelere geldiğinde saçılır ve daha hızlı ilerler malzeme ısının iletmesini yavaşlatacağı gibi ısıyı soğuracaktır. Isı değerlerinin yüksek olduğu bölgelerde kızılötesine yakın renkler ile renklenecektir ve süreksizlik tespitinde kolaylık sağlayacaktır. Havacılıkta kullanılan ultrasonik yöntemlerin aksine bir defada büyük parçaları muayene etme olanağı sağlar, aynı zamanda süreksizliğin şekli ve yeri hakkında bilgi verir.

Termografi yöntemi genel aktif ve pasif olarak sınıflandırılır. Pasif termografi tipik olarak termal dengede olmayan ve çalıştıkları ortamdan farklı bir sıcaklığa sahip malzemeler için kullanılır. Pasif termografi, ortaya çıkan histeretik ısının kızılötesi

kamerayla izlenebilen zamana bağılı sıcaklık değişimlerine izin vermesi nedeniyle döngüsel yükleme için uygundur [214]. Örneğin uçak ile su arasındaki önemli sıcaklık farkından dolayı uçağın inişinden hemen sonra uçak kompozitlerinde suyun tespiti için pasif termografi kullanılabilmektedir [215].

Aktif termografi ise ısı üretmek için optik radyasyon (örn. halojen ısı lambaları ve lazer) ve elektromanyetik uyarım (indüklenmiş girdap akımları ve mikrodalgalar) gibi harici uyarıma kaynaklarını kullanarak malzemenin incelenmesine olanak sağlar [216]. Aktif Termografide, yapının bütünlüğü hakkında bilgi sağlamak için ortam yüzeyindeki sıcaklık gradyan tepkileri bir termal kamera tarafından kaydedilir ve analiz edilir. Aslında, termal dalgalar difüzyon yoluyla numunenin içinde aktığından, bir malzeme kusuru üzerindeki ısı yayılma hızı çevredeki alandan farklı olacaktır ve ortaya çıkan termal tepki, malzeme hasarını tespit etmek ve ölçmek için kullanılabilir. Bu nedenle aktif termografi, ultrasonik faz dizisi ve X-ışını sistemi gibi daha gelişmiş NDT ekipmanlarıyla karşılaştırıldığında çok düşük maliyetlere sahiptir [217].



Şekil 3.2. Yüzey altı hataların termografi yöntemi ile kontrolü [218].

Optik uyarıma dayalı esas olarak iki klasik aktif termografik teknik vardır, lock in termografi (LT) ve pils termografi (PT). Bu iki teknik ısı yayılımı ve termal dalga

yansıması ilkesine dayanmaktadır, ancak pratikte uygulanma şekilleri bakımından farklılık göstermektedir [219,220].

3.6.2.1. Lock in Termografi (LT)

Lock in termografide (LT) numunenin yüzeyi numuneye termal dalgalar göndermek için bir veya daha fazla modüle edilmiş ısıtma kaynağı, halojen lambalar tarafından periyodik olarak ısıtılır. Periyodik dalga, ısıtının üretildiği numune yüzeyine ulaşana kadar havada radyasyon yoluyla yayılır ve malzeme boyunca yayılır. Isı yayılımı için bariyer görevi gören iç kusurlar, yüzeydeki yanıt sinyalinin genliğinde ve faz gecikmesinde değişikliklere neden olur. Lambalar, ideal olarak kararlı bir durum elde edilene kadar en az bir döngü boyunca belirli bir modülasyon frekansında periyodik dalgalar gönderir. Genlik ve faz bilgisini çıkarmak için farklı teknikler geliştirilmiştir. LT’de ısı numuneye sabit frekansta verilir [221].

3.6.2.1. Pals Termografi (PT)

Pals termografide (PT) numune yüzeyi fotoğraf flaşları gibi yüksek güç kaynağı kullanılarak kısa bir ısı darbesine tabi tutulur. Palsin süresi hem numunenin hem de kusurun termofiziksel özelliklerine bağlı olarak yaklaşık 2-15 ms arasında değişebilir. Isı numunenin yüzeyi ile temas ettikten sonra yüzeyden numunenin içine doğru ilerler. Zaman geçtikçe hem malzemenin hem de kusurun termal özelliklerine bağlı olarak, yüzeydeki kusurlu olmayan bölgelere göre daha yüksek veya daha düşük sıcaklıkta kusurlu bölgeler görünecektir. Yüzeydeki sıcaklık gelişimi daha sonra kızılötesi kamera kullanılarak geçici rejimde izlenir. Termal darbenin başlatılması ile kızılötesi kamerayla kayıt yapılması arasındaki süreyi kontrol etmek için bir senkronizasyon ünitesine ihtiyaç vardır. Ayrıca PT’de ısı numuneye karışık genliklerde ve frekanslarda verilir [221,222]. FGNP katkısının CFRP nanokompozitlerde uygulanabilirliğini ve yapay hataların tespiti için termografi muayenesi THY TEKNİK AŞ tahribatsız muayene atölyesinden destek alınarak tamamlandı. LT muayenesi 30 ° C ve 46.5 ° C sıcaklığında Flir T640 kamerası ile yapılmıştır. PT muayenesi 20 ° C sıcaklığında Airbus Kit – Pals termografi (S/N: 102581001025) kamerası ile yapılmıştır. Bütün kontrollerde termal kamera ile nanokompozit arasında 1 metre (m) mesafe vardı.

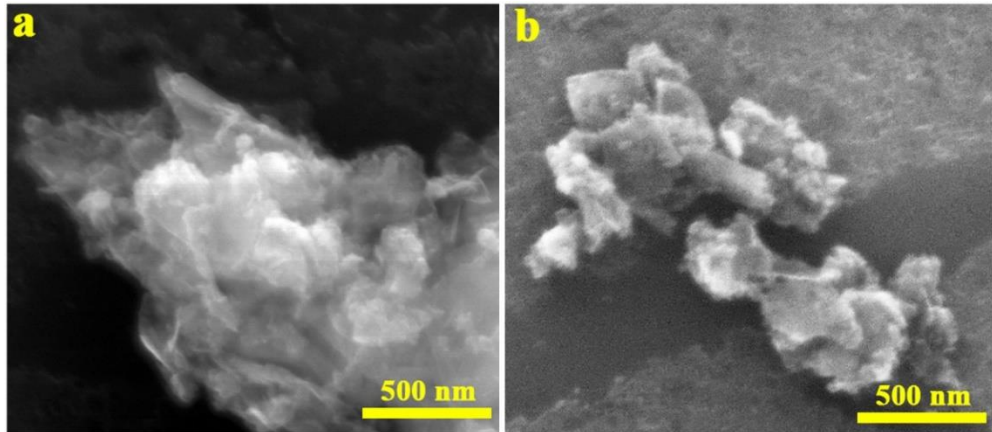
BÖLÜM 4

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

4.1. NANOKOMPOZİT MALZEME ÜRETİM MATERYALLERİ

4.1.1. Grafen Nanoplatelet (GNP)

GNP'ler, düzlemsel formda, trombosit şeklindeki grafen tabakalarının kısa yığınlarından oluşan nanopartiküllerdir. GNP'ler, saf grafit bileşimlerinin bir sonucu olarak mükemmel elektriksel ve termal iletkenlerdir. Grafen nanoplateletler termal, elektriksel iletkenliği ve stabiliteyi artırmaya ve bariyer özelliklerini geliştirmeye yardımcı olur. Şekil 4.1'de transmisyon elektron mikroskobu (TEM) görüntüleri verilen 15 nm kalınlığında ve 30 µm çapında, ince siyah toz şeklinde, spesifik yüzey alanı 170 m²/g, saflık % 99,9; elektrik iletkenliği 1100-1600 S·m⁻¹ ve yoğunluk 1,9-2,2 g/cm³ özelliklerine sahip GNP kullanılmıştır.



Şekil 4.1. GNP'nin transmisyon elektron mikroskobu (TEM) görüntülerini göstermektedir.

4.1.2. Sodyum Dodesil Sülfat (SDS)

Sümfaktanlar, doğadaki çoğu maddenin ya hidrofilik (suyu seven) ya da lipofilik (yağ seven) olduğu gerçeğine dayanarak aynı temel prensiple çalışır. Hidrofilik maddeler suda kolayca çözünür ve lipofilik maddeler, çok fazla karbon ve hidrojen içeren organik bileşikler olan hidrokarbonlarda çözünür. Grafen yüzeyinin aktifleştirilmesi ve fonksiyonlaştırılması için kullanılmıştır, böylelikle grafenin çözeltide daha iyi çözünmesi sağlanarak aglomere olması engellenmiştir. Araştırma çalışmasında GNP'leri fonksiyonlaştırmak için beyaz renkli, 288,38 g/mol moleküler ağırlığa sahip SDS ($C_{12}H_{26}O_4SNa$) kullanılmıştır.

4.1.3. Çok Cidarlı Karbon Nanotüp (MWCNT)

Çok cidarlı karbon nanotüpler termal, elektriksel iletkenliği ve mekanik özellikleri geliştirmeye yardımcı olur. 5-10 mm uzunluğunda, dış çapı 10-20 nm boyutlarında ve % 96'nın üzerinde saflıkta ince siyaz toz görünümünde MWCNT kullanıldı.

4.1.4. Polietilen Glikol Tert-Oktıl Fenil Eter (Triton X-100)

Triton X-100, MWCNT nano katkılarının yüzeyini modifiye edebilmek için en ideal tozları iyonik olmayan sümfaktan ve emülsüyanlaştırıcıdır. Araştırma çalışmasında MWCNT'leri fonksiyonlaştırmak için Triton X-100 kullanılmıştır.

4.1.5. Karbon Fiber Kumaş Takviyesi

Araştırma çalışmasında, havacılık sektöründe yoğun olarak tercih edilen karbon fiber kumaş dimi dokuma tipinde Torayca T300 karbon fiber HT 3k 200 dtex ipinden üretilmiş özel bir kumaştır. Dimi tip karbon fiber kumaş, hafifliğin, dayanımının önemli olduğu uygulamalar için idealdir. Çekme dayanımı, 3950 MPa, elastisite modülü 238 GPa, kopmadaki birim uzama % 1,7; termal iletkenlik 17 W/m·K, termal genleşme katsayısı -0,1; spesifik elektriksel direnç $1,6 \times 10^{-3}$ Wcm, elyaf çapı 7 µm, yoğunluk 1,76 g/cm³ özelliklerine sahiptir. Karbon fiber kumaşın yoğunluğu 200 g/m² ve kalınlığı 0,327 mm'dir. Çözüğü ve atkıda 3k iplik bulunmaktadır. Çözüğü ve atkıdaki

iplikler birbirini 0° ve 90° açılarla keser. FMWCNT katkılı nanokompozitlerde 0°/45°/90° kıvrımsız karbon fiber kumaş kullanıldı.

4.1.6. Epoksi Matrisi

Havacılık epoksi matrisi olan Araldite LY5052 ve sertleştirici olarak Aradur 5052 kürlleme maddesi kullanılmıştır. Araldite LY5052'nin 25 °C'deki yoğunluğu 1,17 g/cm³ ve viskozitesi 1000-1500 mPa·s'dir. Epoksi ve kürlleme maddesi, önerilen ağırlıkça 100:38 oranında karıştırıldı ve 1 gün boyunca 23 °C'de kürlendi, ardından fırında 100 °C'de 1 saat kürlendi. Üstün fiziksel özellikler, kimyasal direnç ve iyi yapışma sunduğundan Araldite LY5052/Aradur 5052 düşük viskoziteli havacılık epoksi sistemi kullanıldı. FMWCNT katkılı nanokompozitlerde 100:60 oranında Eposis 120 havacılık epoksisi ve kürlleme maddesi kullanıldı. Nanokompozit numuneler vakum torbalama metodu ile üretildi. Epoksi, sertleştirici ve karışımın özellikleri Çizelge 4.1'de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Epoksinin, sertleştiricinin ve karışımın fiziksel özellikleri.

Özellikler	Epoksi	Sertleştirici	Karışım
Malzeme	Araldite LY5052	Aradur LY5052	Epoksi
25 °C de Viskozite (mPa·s)	1000 - 1500	40 - 60	300 - 500
25 °C Yoğunluk (g/cm ³)	1,17	0,94	1,05
Görünüm	Şeffaf	Şeffaf	Şeffaf
Karışım oranı (Ağırlıkça)	100	38	-
Kürlleme (Bu çalışma)	-	-	1 gün 23 °C+1 saat 100 °C

4.2. DENEY TASARIMI VE NANOKOMPOZİT MALZEME ÜRETİM METODU

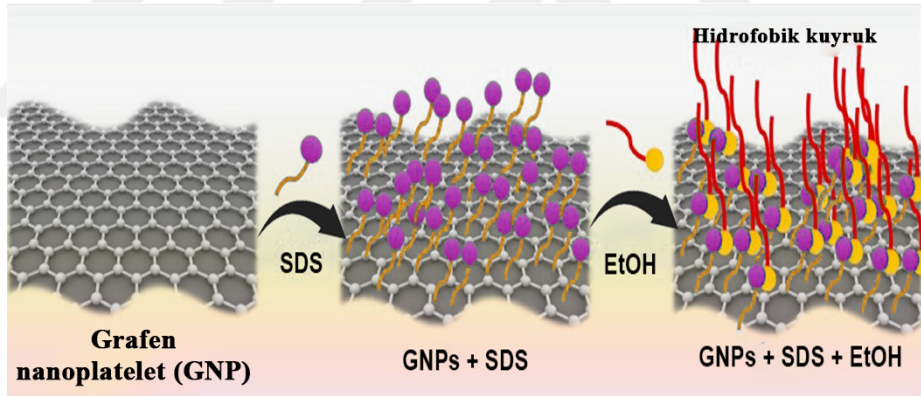
4.2.1. GNP'lerin Fonksiyonlaştırılması ve Epoksi Çözeltilisinin Hazırlanması

Şekil 4.3 (a)'da verildiği gibi ayrı beherlere 100 ml etil alkol (Sigma Aldrich % 99,9) ilave edildi, eklenecek epoksi ve sertleştiricinin toplam ağırlığına (138 gr) göre % 0,5 – 1 – 1,5 GNP ilave edildi ve oda sıcaklığında 30 dakika ultrasonik banyo yapıldı. SDS

sülfaktanı, GNP yüzeyini işlevselleştirmek için oda sıcaklığında 30 dakika boyunca bir ultrasonik banyoda ve 30 dakika boyunca bir manyetik karıştırıcıda 500 RPM’de karıştırıldı. SDS miktarını belirlemek için kritik misel konsantrasyonu (CMC) yöntemi kullanıldı (Şekil 4.2).

Koloidal ve yüzey kimyasında [65] CMC, üzerinde misellerin olduğu sürfaktan konsantrasyonu ve sisteme eklenen herhangi bir ilave sürfaktanın misel oluşturduğu sürfaktan konsantrasyonu olarak tanımlanır. CMC’ye ulaşmadan önce yüzey gerilimi, sürfaktan konsantrasyonuna göre büyük ölçüde değişir. CMC’ye ulaştıktan sonra yüzey gerilimi nispeten sabit kalır veya daha düşük bir eğimle değişir [223][63]. SDS için CMC değeri 25 °C’de 0.0082 mol/l’dir [224,225].

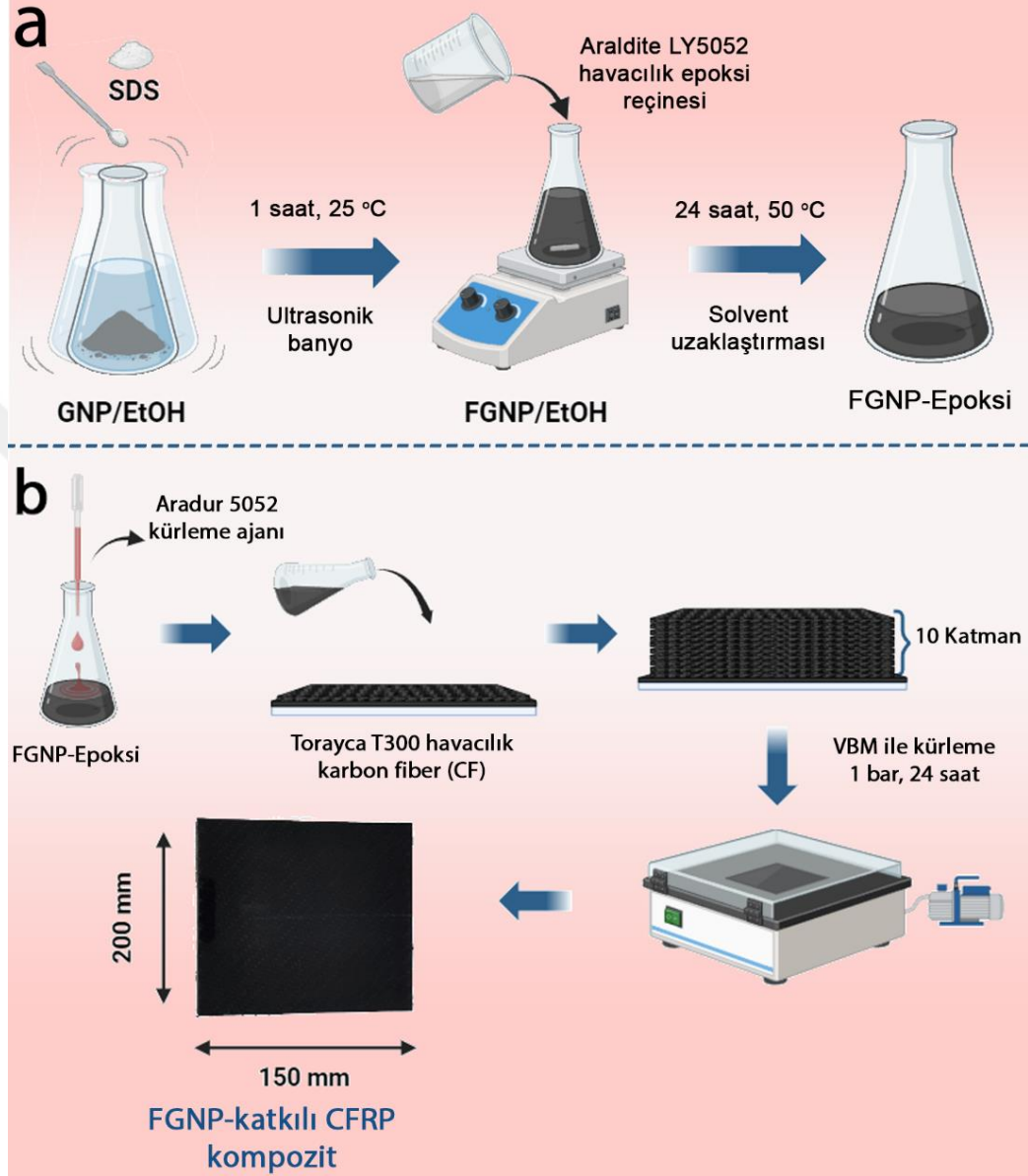
Bir litrelik çözelti için = SDS molekül ağırlığı x CMC değeri
= 288.38 g/mol x 0.0082 mol/l
= 2.364 gr/l olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.2. GNP’lerin SDS ile fonksiyonlaştırılması.

Çözeltiye 100 gr Araldite LY5052 epoksi matris eklenmiş, oda sıcaklığında 30 dakika ultrasonik prop ile sonikasyon uygulandıktan sonra 30 dakika ultrasonik banyo uygulanmış, aglomerasyonu tespit etmek ve GNP’lerin yüzeyinin fonksiyonlaştığını teyit etmek için UV-Vis Absorpsiyon Spektroskopisi yapılmıştır. Manyetik karıştırıcıda 750 RPM’de 50 °C’de 2 gün karıştırılarak etil alkol tamamen buharlaştırılmıştır.

38 gr Aradur 5052 sertleştirici behere eklendi ve bir cam çubuk kullanılarak elle karıştırıldı. Karıştırma sırasında oluşan kabarcıkları gidermek için gaz giderme vakum altında gerçekleştirildi.

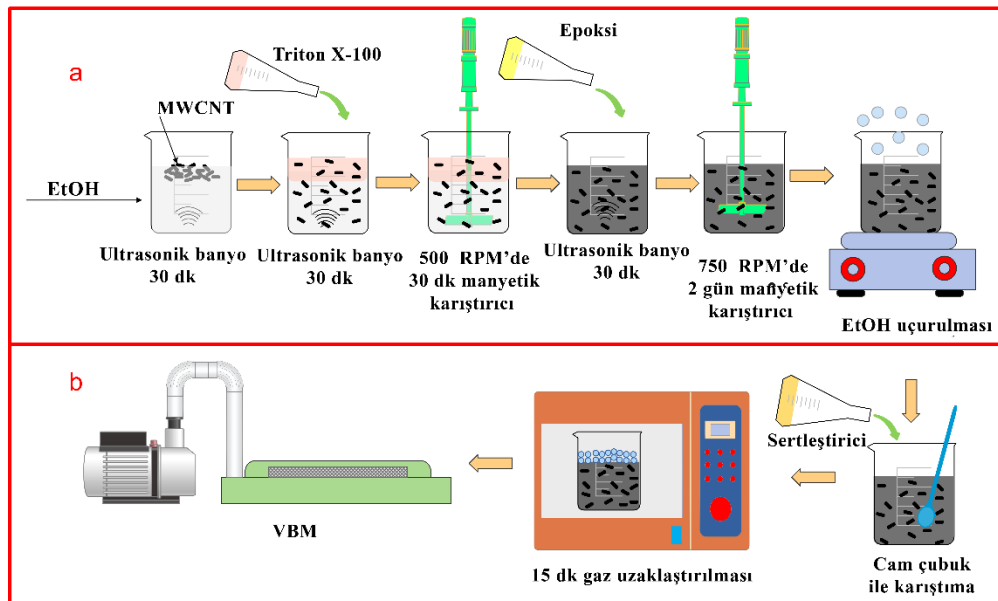


Şekil 4.3. Homojen FGNP-epoksi çözeltisinin oluşturulması (a) ve VBM yöntemiyle FGNP katkılı CFRP nanokompozit üretimi (b).

4.2.2. MWCNT'lerin Fonksiyonlaştırılması ve Epoksi Çözeltisinin Hazırlanması

Şekil 4.4 (a)'da verildiği gibi ayrı beherlere 100 ml etil alkol (Sigma Aldrich %99,9) ilave edildi, eklenecek epoksi ve sertleştiricinin toplam ağırlığına (138 gr) göre % 0,5 – 1 – 1,5 MWCNT ilave edildi ve oda sıcaklığında 30 dakika ultrasonik banyo yapıldı.

Triton-X sürfaktanı, MWCNT yüzeyini aktive etmek ve işlevselleştirmek için oda sıcaklığında 30 dakika boyunca bir ultrasonik banyoda ve 30 dakika boyunca bir manyetik karıştırıcıda 500 RPM’de karıştırıldı. SDS miktarını belirlemek için kritik misel konsantrasyonu (CMC) yöntemi kullanıldı. Koloidal ve yüzey kimyasında [65] CMC, üzerinde misellerin oluştuğu sürfaktan konsantrasyonu ve sisteme eklenen herhangi bir ilave sürfaktanın misel oluşturduğu sürfaktan konsantrasyonu olarak tanımlanır. CMC’ye ulaşmadan önce yüzey gerilimi, sürfaktanın konsantrasyonuna göre büyük ölçüde değişir. CMC’ye ulaştıktan sonra yüzey gerilimi nispeten sabit kalır veya daha düşük bir eğimle değişir [223][63]. Sürfaktan olarak kullanılan Triton X-100’ün ortalama molekül ağırlığı 650 g/mol’dür ve 25°’de 0,2 mM’lik bir CMC’ye sahiptir [183]. Çözeltiye 100 gr Araldite LY5052 epoksi matris eklenmiş, oda sıcaklığında 30 dakika ultrasonik prop ile sonikasyon uygulandıktan sonra 30 dakika ultrasonik banyo uygulanmış, aglomerasyonu tespit etmek ve GNP’lerin yüzeyinin fonksiyonlaştığını teyit etmek için UV-Vis Absorpsiyon Spektroskopisi yapılmıştır. Manyetik karıştırıcıda 750 RPM’de 50 °C’de 2 gün karıştırılarak etil alkol tamamen buharlaştırılmıştır. 38 gr Aradur 5052 sertleştirici behere eklendi ve bir cam çubuk kullanılarak elle karıştırıldı. Karıştırma sırasında oluşan kabarcıkları gidermek için gaz giderme vakum altında gerçekleştirildi.



Şekil 4.4. Homojen FMWCNT-epoksi çözeltisinin oluşturulması (a), VBM yöntemiyle FMWCNT katkılı CFRP nanokompozit üretimi (b).

4.2.3. Nanokompozit Plakaların Üretimi

Vakum torbalama üretim yöntemi ile 10 kat karbon fiber kumaştan oluşan 200 mm genişliğinde, 150 mm uzunluğunda ve 20 mm kalınlığında ikisi katkısız kompozit üçü FGNP katkılı nanokompozit ve üçü FMWCNT katkılı nanokompozit olmak üzere toplam 8 plaka üretildi. Tüm paneller için kullanılan epoksi sistemi Araldite LY5052/Aradur 5052 idi. Katkısız üretilen kompozitlerin haricinde nanokompozit plakalarda epoksi içerisinde ağırlıkça % 0,5 – 1 – 1,5 FGNP veya % 0,5 – 1 – 1,5 FMWCNT bulunmaktadır. Üretilen katkısız kompozitler ve nano katkılı kompozitlerin isimleri ve içerikleri Çizelge 4.2’de verilmiştir.

Çizelge 4.2. Nanokompozitlerin isimlendirilmesi ve içerikleri.

Tanım	Karbon Fiber Takviye	Epoksi Matris	FGNP (wt.%)	FMWCNT (wt.%)	Sülfaktan
Katkısız 1			-	-	-
0,5 FGNP	3K TW CF 0°/90°	Araldite LY5052 (Aradur 5052)	0,5	-	SDS
1 FGNP			1	-	SDS
1,5 FGNP			1,5	-	SDS
Katkısız 2			-	-	-
0,5 FMWCNT	CF 0°/45°/90°	Eposis 120	-	0,5	Triton X-100
1 FMWCNT			-	1	Triton X-100
1,5 FMWCNT			-	1,5	Triton X-100

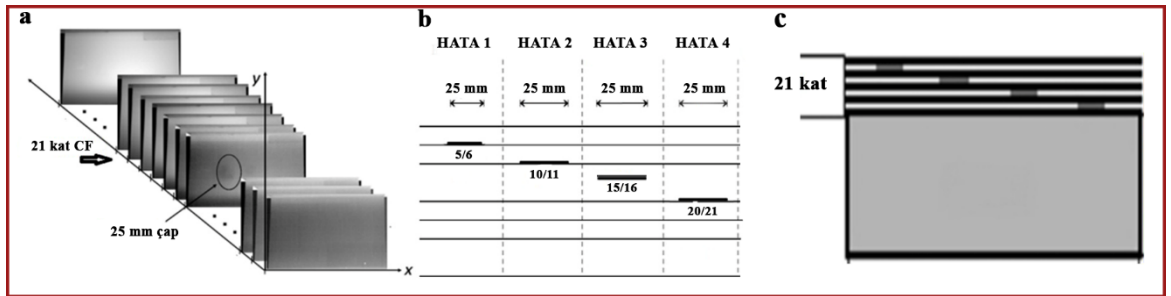
wt: weight

Matris modifikasyon işlemleri genel olarak fiber/matris ağırlık oranına (1:1) göre belirlenen FGNP’nin/FMWCNT’nin epoksi matris sistemine katkısını içerir. Numunelerin mekanik özelliklerini iyileştirmek için 1 bar vakum basıncı altında 23 °C’de 1 gün kürleme yapıldıktan sonra 100 °C’de fırında 1 saat kürleme yapıldı. FGNP katkılı nanokompozitlerin üretiminin şematik çizimleri Şekil 4.3 (b)’de verilmiştir. FMWCNT katkılı nanokompozitlerin üretiminin şematik çizimleri Şekil 4.4 (b)’de verilmiştir. Üretimi Şekil 4.5’te görsel anlatım ile verilen nihai ürünler, yapılacak analizlerin standartlarına göre kompozit kesme makinasında mekanik testler için istenilen ebatlarda kesildi.



Şekil 4.5. Nanokompozitlerin üretim aşamaları.

Ayrıca Şekil 4.6'da verilen resimde de görsel olarak açıklandığı gibi termografi metodunun FGNP katkılı CFRP nanokompozitlerdeki hassasiyetini belirlemek için aynı yöntemle 21 kat karbon fiber kumaş kullanılarak 200 mm genişliğinde, 150 mm uzunluğunda ve 64 mm kalınlığında biri katkısız kompozit üçü FGNP katkılı nanokompozit olmak üzere 4 plaka üretildi. Her 5 kumaş katında 1 yapay hata olmak üzere her numuneye 4 yapay hata yerleştirildi. Hatalar 25 mm çapında birbirine yapıştırılmış alüminyum bant ve teflon ikilisinden oluşmaktadır.



Şekil 4.6. Termografi metodunun uygulanabilirliğinin kontrolü için yapay hata içeren FGNP katkılı CFRP'lerin üretilmesi.

BÖLÜM 5

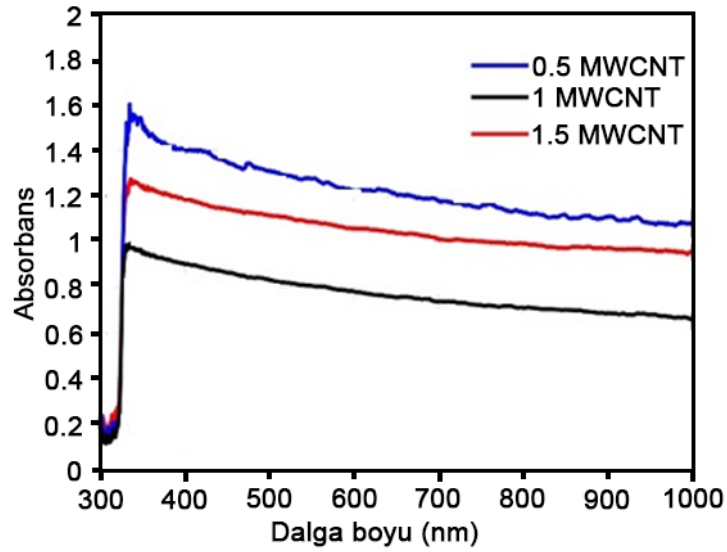
DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

5.1. FMWCNT SONUÇLARI

Bu kısımda FMWCNT katkılı CFRP nanokompozitlerine yapılan kimyasal karakterizasyon (UV-Vis spektroskopisi, FT-IR spektroskopisi), termal karakterizasyon (DSC spektroskopisi) ve elektriksel karakterizasyon (empedans spektroskopisi) yapılmıştır.

5.1.1. UV-Vis Spektroskopi Sonuçları

Triton X-100 MWCNT'leri homojen dağıtmada, stabilize etmede ve fonksiyonlaştırmada etkili bir sürfaktandır ve FMWCNT'lerin dağılma yeteneği, UV-Vis spektroskopisi ile analiz edildi. Şekil 5.1'de epoksi çözeltilerinin UV-Vis absorpsiyon spektrumları gösterilmektedir. Tüm FMWCNT katkılı epoksi çözeltilerin absorbands değeri 325 nm civarındaydı. 0,5 FMWCNT çözeltisinin absorbands değeri 1,6 a.u., 1 FMWCNT çözeltisinin absorbands değeri 1 a.u. ve 1,5 FMWCNT çözeltisinin absorbands değeri 1,3 a.u. olarak ölçülmüştür. En yüksek absorbands değeri 0,5 FMWCNT çözeltisinde olduğu görülmüştür. Karbon allotrobu nano katkılar van der Waals'ın çekici kuvvetlerin (π - π çekiçi kuvvetler) etkisinde birleşme eğilimindedirler. Triton X-100 sürfaktanı yüzeye tutunarak π - π çekici kuvvetlerin etkisini azaltır, dolayısıyla ters etki yaratarak itici kuvvet özelliği sergilerler. Ancak bu çalışmada görüldüğü üzere epoksi çözeltisinde homojen dağılım elde edebilmek için ağırlıkça % 0,5 FMWCNT nano katkısı yeterlidir, FMWCNT konsantrasyonlarında π - π çekiçi kuvvetlerinin etkisi daha belirgin hale gelir yeniden topaklanma eğilimi başlar. 1,5 FMWCNT çözeltisinin absorbands değerinin 1 FMWCNT'ye göre yüksek çıkması ise nano katkı miktarı arttıkça çözeltide asılı kalan FMWCNT'lerin sayısının artmasına bağlı olarak emilimin yüksek olmasıdır [183].



Şekil 5.1. MWCNT ilaveli epoksi kompozitlerin UV-görünür absorpsiyon spektrumları.

5.1.2. FT-IR Spektroskopi Sonuçları

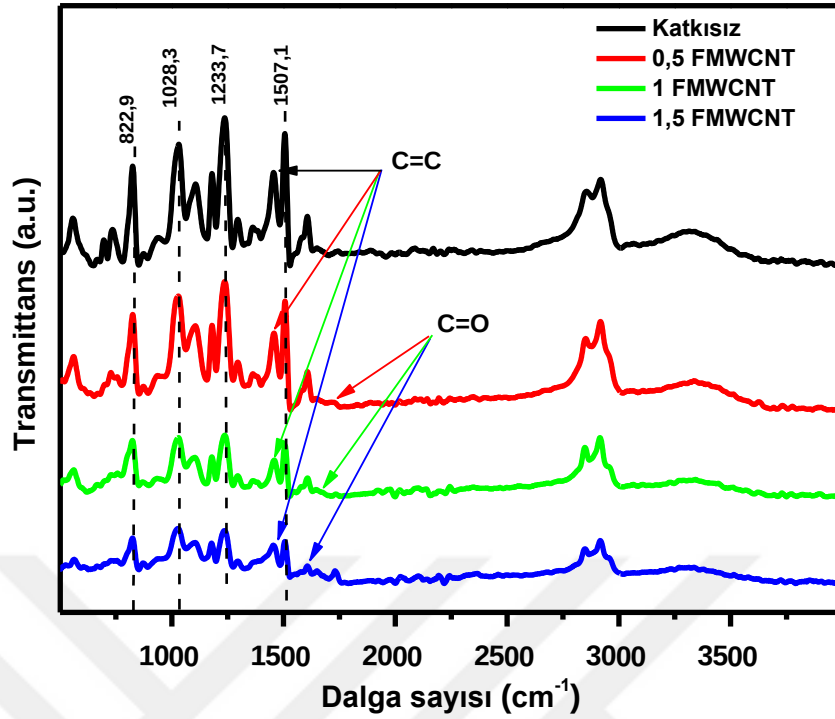
Şekil 5.2’de verilen $2916,5\text{ cm}^{-1}$, $1610,1\text{ cm}^{-1}$, $1507,1\text{ cm}^{-1}$, $1233,7\text{ cm}^{-1}$, $1028,3\text{ cm}^{-1}$ ve $822,9\text{ cm}^{-1}$ ’deki zirveler epoksi fonksiyonel grupların varlığına işaret etmektedir. $1733,7\text{ cm}^{-1}$ ’deki gerilme, MWCNT’nin $-\text{COOH}$ modifikasyonu sırasında oluşan karboksil grubu (COOH) bandını ima etmektedir. Başka bir deyişle 0,5 – 1 – 1,5 FMWCNT nanokompozitleri, $1733,7\text{ cm}^{-1}$ ’de $\text{C}=\text{O}$ gerilmesi göstermiştir, bu durum epoksi ile FMWCNT yüzeylerinin COOH grubu arasında bir esterleşme reaksiyonunun meydana geldiğini gösterir.

Epoksiye FMWCNT eklendiğinde bir tepe kayması gözlemlendi (3288 cm^{-1} ’den 3313 cm^{-1} ’e kadar güçlü O-H gerilmesi ve 1417 cm^{-1} ‘den 1426 cm^{-1} ‘e kadar orta derecede $\text{C}=\text{C}$ gerilmesi). Bu bant kayması epoksi ile fiber arasında iyi bir korelasyon olduğunu gösterir. Katkısız kompozit ve 0,5 FMWCNT nanokompozitlerde $3250\text{--}3500\text{ cm}^{-1}$ ’de geçirgenlikte hafif bir azalma gözlenmektedir. Öte yandan 1 FMWCNT ve 1,5 FMWCNT numuneleri, OH ile reaksiyona girebilecek daha yüksek COOH içeriyordu. Dolayısıyla, bu nanokompozitlerde daha az OH mevcut kaldı. Bu sonuçlar deneysel olarak gözlemlendiği gibi, epoksi ve COOH ile işlevselleştirilmiş MWCNT’ler arasındaki reaksiyonun yeni bir epoksi-FMWCNT nanokompoziti ürettiğini

doğrulamaktadır. FMWCNT epoksi içerisine dahil edildiğinde 1450 cm^{-1} – 1454 cm^{-1} C=C (orta gerilme) bir tepe kayması meydana geldi. Bu bant kayması matris ve takviye arasında iyi bir etkileşimin olduğunu gösterir. Bu sonuçlardan anlaşılabileceği üzere FMWCNT ilavesi arttıkça elde edilen geçirgenlik yoğunlukları orantılı olarak azalmaktadır. Elde edilen geçirgenlik verileri arasında tutarlılık ve paralellik elde edildi.

Ayrıca bu çalışmada kullanılan sürfaktana bağlı olarak Şekil 5.2'deki FT-IR sonucundan alkol gibi herhangi bir kalıntı maddenin bulunmadığı anlaşılmaktadır. MWCNT'lerin işlevselleştirilmesi, MWCNT'lerin topaklanmasını önlemek ve daha iyi dağılım ve güçlü arayüzey etkileşimleri elde etmek için MWCNT'ler ile polimer arayüzü boyunca yük transfer yeteneğini geliştirmek için etkili bir yöntem olarak kabul edilmiştir [226]. Bununla birlikte, MWCNT'lerde kalıntıların bulunmadığı kabul edilebilir. Nihai ürün olan FMWCNT katkılı nanokompozitler, bu çalışmada yapısal bozulmaya neden olmayan soğutulmuş sonikasyon, gazdan arındırma ve kütleme işlemlerinin etkinliğini göstermektedir [107,227].

Lui vd. farklı inorganik ve organik moleküller gibi fonksiyonel moleküllerin π – π yığılmasını, van der Waals veya yük transfer ilişkileri yoluyla CNT'lerin yan duvarına adsorpsiyonla ilgili olduğunu bildirmiştir [226]. Sonuçları arasında π – π yığılması, CNT duvarı ve fonksiyonel moleküller arasındaki delokalize π bağları arasında en güçlü ilişkiye sahipti.

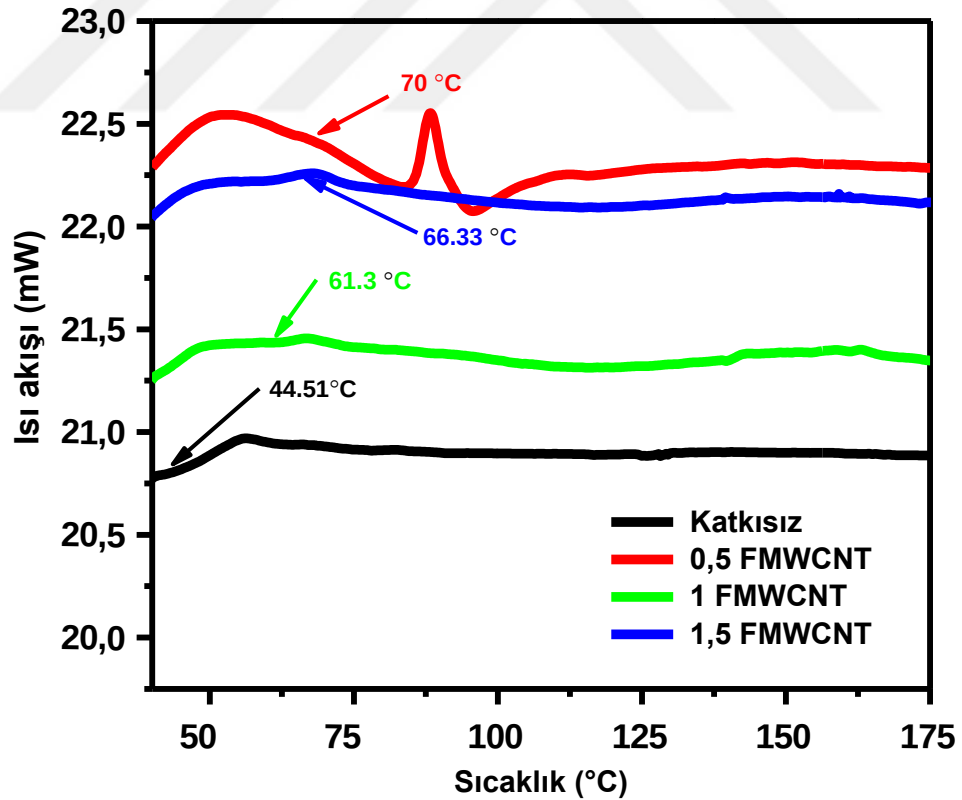


Şekil 5.2. FMWCNT katkılı nanokompozitlerin FT-IR sonuçları.

5.1.3. DSC Spektroskopisi Sonuçları

Diferansiyel taramalı kalorimetri, termoanalitik olarak kullanılır. Bir malzeme numunesinin ve referansın sıcaklığını yükseltmek için gereken ısı miktarındaki farkın, sıcaklığın bir fonksiyonu olarak belirlendiği tekniktir. Şekil 5.3'te ısı akışı (mW) ile sıcaklık grafiği gösterilmektedir. Bu grafikten de görülebileceği gibi oda sıcaklığından sıcaklığın artmasıyla ısı iletimi maksimum yaklaşık 50 °C'ye ulaşır ve bundan sonraki ısı akışında önemli bir değişiklik görülmez. Ancak genel olarak 200 °C'ye göre göreceli bir artışa işaret eder. Katkısız CFRP kompozit en düşük ısıl iletkenliği gösterirken, en yüksek ısıl iletkenliği 0,5 FMWCNT nanokompoziti gösterdi. Önceki araştırmacıların belirttiği gibi, nispeten iletken MWCNT'nin eklenmesi, katkısız CFRP'ye ilave termal iletkenlik sağladı. Başka bir deyişle FMWCNT eklemeyen katkısız kompozitte epoksi 44.51°C'de ekzotermik bir zirve yapmasına neden olur. Epoksiye ağırlıkça % 0,5 oranında MWCNT-COOH eklenmesi, 70°C'de başlangıç zirvesini artırmıştır. Bu durum COOH gruplarının izotermal olmayan ısıtma üzerine epoksi gruplarıyla reaksiyona girerek ester bağlantısına neden olduğunu gösterir [228,229].

Ana ekzotermik zirve, 0,5 FMWCNT nanokompozitleri için yaklaşık 70°C’de başlarken, 1 FMWCNT veya 1,5 FMWCNT nanokompozitleri için marjinal olarak biraz daha düşüktü. Bu durum nanokompozitlerin katalitik davranışını gösterir. Başka bir açıklamaya göre ağırlıkça 0,5 FMWCNT nanokompozitinin reaksiyon ısısı, hem ağırlıkça 1 FMWCNT hem de ağırlıkça 1,5 FMWCNT nanokompozitlerinkinden çok az daha yüksekti, bu da kütleme seviyesinde bir düşüşe işaret ediyordu. Araştırmacılar, MWCNT ve CFRP’li polimer kompozitlerin ısı iletkenliğini arttırdığını bildirmişlerdir [230]. Park vd. MWCNT ilavesi ile sağladığı ısı iletkenliğin, MWCNT ilavesi yapılmayanlara göre göreceli olarak azaldığını bildirmişlerdir [230]. Bu çalışmada sürfaktan faktörünün de devreye girmesiyle elde edilen FMWCNT’lerin daha avantajlı olduğu bu göstermektedir. Ancak Zakaria ve diğerleri epoksi ile güçlendirilmiş MWCNT’nin ısı iletkenliği grafen nano katkısından daha fazla artırmadığını bildirmiştir [231].



Şekil 5.3. FMWCNT katkılı nanokompozitlerin DSC sonuçları.

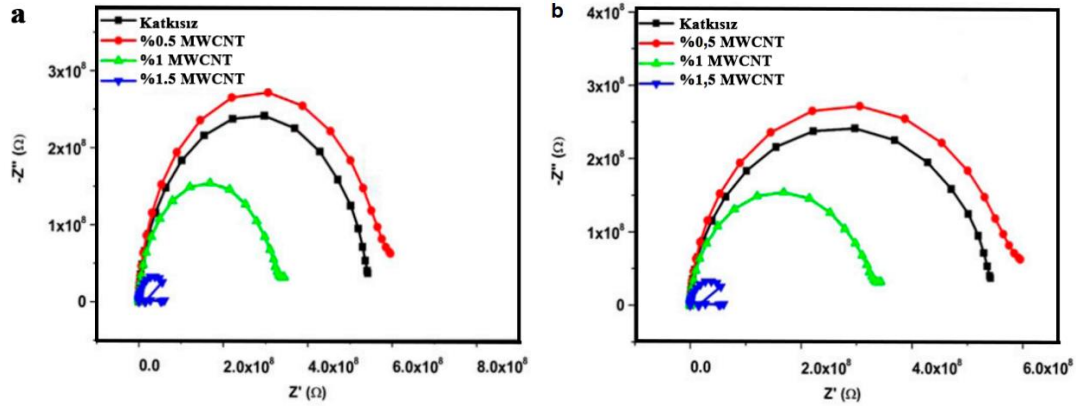
5.1.4. Empedans Spektroskopisi Sonuçları

Empedans spektroskopisi katkısız kompozit ile karşılaştırmalı olarak FMWCNT miktarına bağlı olarak elektrik direncinin değişimini göstermektedir.

Şekil 5.4'te elektriksel iletkenlik ve empedans spektroskopisi ölçümleri 20°C'de (a) ve 120°C'de (b) yapılmıştır. Bilindiği gibi empedans spektroskopisi frekansın bir fonksiyonu olarak elektrik empedansını ölçer. Elektriksel polarizasyon süreçlerini gevşeme frekanslarına veya zaman sabitlerine göre analiz eder.

Şekil 5.4. (a)'da görüldüğü gibi, epoksi matrisine FMWCNT'nin eklenmesi yarım daire şeklinde Nyquist eğri oluşturdu. MWCNT konsantrasyonu arttıkça bu yarım dairelerin çapı azalır, bu durum polimer matrisinde oluşan daha iletken zincirler nedeniyle nanokompozit numunelerin daha düşük elektrik direncini gösterir. 0,5 FMWCNT nanokompoziti tüm sıcaklıklarda Nyquist diyagramı eğrilerinin çapını arttırarak daha yalıtkanlaşmış görünmektedir, ancak 1 FMWCNT ve 1,5 FMWCNT gibi daha yüksek katkı miktarlarında Nyquist diyagramı eğrilerinin çapı azalmıştır ve dielektrik sabitleri düşmüştür. MWCNT katkısının artmasıyla yarım dairelerin daha küçük Z'ye dönüştüğü görülmüştür.

Fonksiyonlaştırma işlemi ile FMWCNT'lerin yüzeyinde oluşan oksijen grupları MWCNT'nin sp^2 ağ yapısını bozmuşlardır ve "percolation threshold" diye bilinen voltaj eşik değerini arttırmışlardır, dolayısıyla iç iletkenliği azaltmışlardır. Oksitlenme FMWCNT tabakaları arasında enerji bariyerini arttırarak anahtarlama voltajını yükseltmişlerdir [232–234]. Ancak ağırlıkça %1 FMWCNT katkısından sonra voltaj eşik değeri azaldığı için anahtarlama voltajı düşerek üretilen nanokompozitin dielektrik katsayısı azalmıştır.



Şekil 5.4. FMWCNT katkılı nanokompozitlerin empedans (Z'' - Z') spektroskopisi ölçümleri 20°C (a) ve 120°C (b).

5.1.5. Elektrik İletkenliği Sonuçları

Elektriksel iletkenlik Şekil 5.5'te, frekansa karşı elektriksel iletkenliği gösterilmiştir. Şekil 5.5'de sonuçları verilen elektriksel iletkenlik ölçümleri 20°C'de (a) ve 120°C'de (b) yapılmıştır. Bilindiği gibi empedans spektroskopisi frekansın bir fonksiyonu olarak elektrik empedansını ölçer. Elektriksel polarizasyon süreçlerini gevşeme frekanslarına veya zaman sabitlerine göre analiz eder.

Şekil 5.5 (a)'da 1,5 FMWCNT nanokompozitinin tüm sıcaklıklarda en iyi iletken olduğu görülmüştür. Aynı zamanda sıcaklığın artmasının iletkenliği de arttırdığı gözlemlendi. 10 Hz frekansta, 1,5 FMWCNT nanokompoziti 20°C'de yaklaşık $1,1 \times 10^{12}$ S.cm⁻¹, 100°C'de $1,1 \times 10^{10}$ S.cm⁻¹ ve 120°C'de $1,14 \times 10^8$ S.cm⁻¹ iletkenlik gösterdi. Ayrıca 800.000 Hz gibi yüksek frekanslarda 1,5 FMWCNT nanokompoziti 20°C'de yaklaşık $3,9 \times 10^7$ S.cm⁻¹ ve 100°C'de $6,8 \times 10^7$ S.cm⁻¹ iletkenlik gösterirken, 120°C'de yaklaşık $7,55 \times 10^7$ S.cm⁻¹ iletkenlik gösterir. Ancak 0,5 FMWCNT nanokompozitin iletkenlik değerinin 100 - 10.000 Hz gibi düşük frekanslarda önemli ölçüde arttığı görülmektedir. FMWCNT doğal olarak bir elektrik iletkenidir.

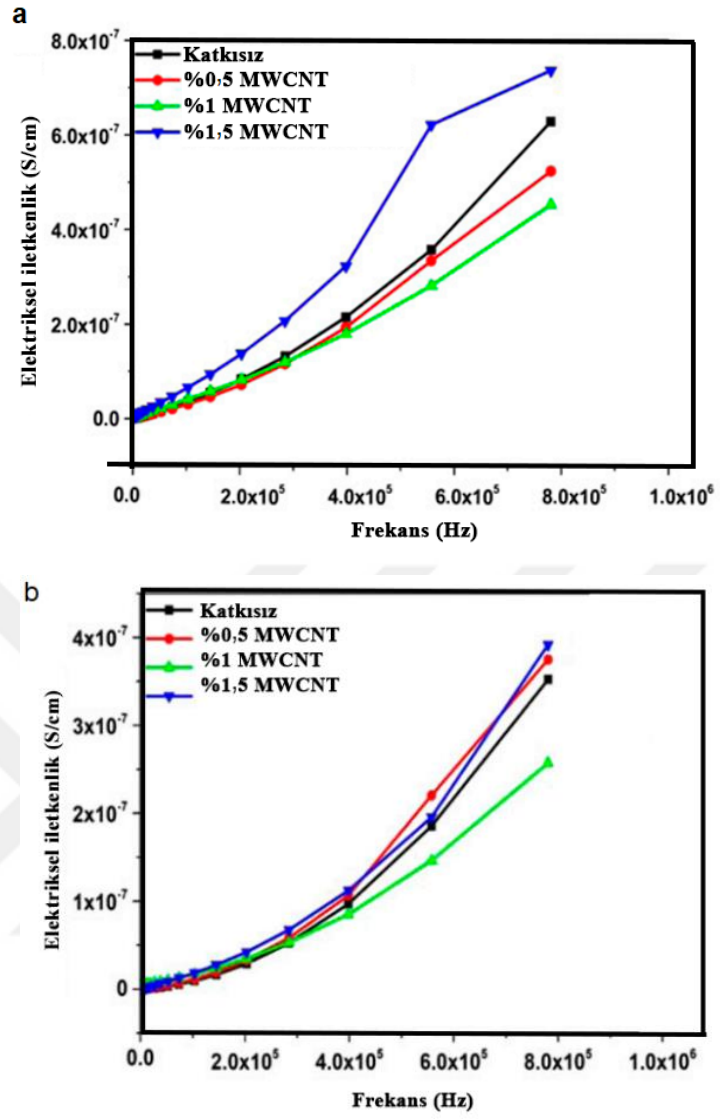
Epoksi nanokompozitlerin elektriksel iletkenliği, MWCNT yükleme konsantrasyonunun artmasıyla artar. Fonksiyonlaştırılmış MWCNT'ler dispersiyon kalitesini artırmıştır ve polimer matris ile arayüzey bağlanma gücünü güçlendirmiştir. Bununla birlikte, ağırlıkça düşük miktarlarda fonksiyonlaştırılmış MWCNT'lerin bir

epoksi matrisine dahil edilmesi, nanokompozitin elektriksel iletkenliğini azaltmıştır. Elektrostatik yük dağıtımı için ağırlıkça % 0.5 FMWCNT konsantrasyonundan daha fazlasını yüklemek gerekir. Bununla birlikte, karboksillenmiş MWCNT'ler, elektrostatik yük dağılımı için ağırlıkça %1.5'ten fazlasının eklenmesini gerektirir [235].

Ayrıca 20°C ile 253°C arasında süperiletken olduğu da iddia edilmektedir [235]. MWCNT nano-polimer kompozitleri, MWCNT'nin iyi bir dağılımı ile düşük geçirgenlik eşiği ve daha düşük elektrik direnci ile etkili olur [236]. Polimer matrisli kompozitler ile katkılandırıldığında matrisin Tg değerinden daha fazla sıcaklık değerine maruz bırakılamazlar. Bu çalışmada kullanılan matrisin Tg değeri 120°C olduğu için maksimum bu sıcaklıkta iletkenlik ölçümü yapılmıştır.

Şekil 5.5'te de görüldüğü gibi MWCNT ilave miktarının artışına bağlı olarak elektriksel iletkenlik direnci azalır. Sonuç olarak sürfaktan kullanılarak sağlanan MWCNT'lerin epoksi için homojen bir şekilde dağılabileceği görülmüştür. Buna göre daha düşük elektriksel iletkenlik direnci elde edilir [97,230,237].

Heterojen polimerler için elektronik ve atomik yönelim ve arayüzey polarizasyonu gibi birkaç faktör dielektrik sabitini etkiler. Ayrıca dolgu maddelerinin iletkenliği ve dolgu maddeleri ile epoksi matris arasındaki ara yüzey yapışması, epoksi nanokompozitlerin elektriksel tepkisini belirler. Grafiklere göre FMWCNT, katkısız kompozitten daha yüksek bir dielektrik sabiti gösterdi. Bunun nedeni, polarizasyon sürecinin değişimine neden olan MWCNT'nin epoksi matrisine eklenmesidir. MWCNT, üstün elektriksel özellikler sergileyen sp^2 hibritlenmiş karbon atomlarından oluşur. Hibritleşmiş sp^2 deki π elektronlarının delokalizasyonu, bir elektrik alanı uygulandığında elektronların serbestçe hareket etmesini sağlar. Sonuç olarak MWCNT gibi iletkenliği yüksek dolgu maddeleri mikro kapasitör oluşumuna yol açarak epoksi nanokompozitlerin dielektrik sabitini artırır [238].



Şekil 5.5. FMWCNT katkılı nanokompozitlerin elektriksel iletkenliği (S/cm⁻¹); 20°C (a) ve 120°C (b).

5.2. FGNP SONUÇLARI

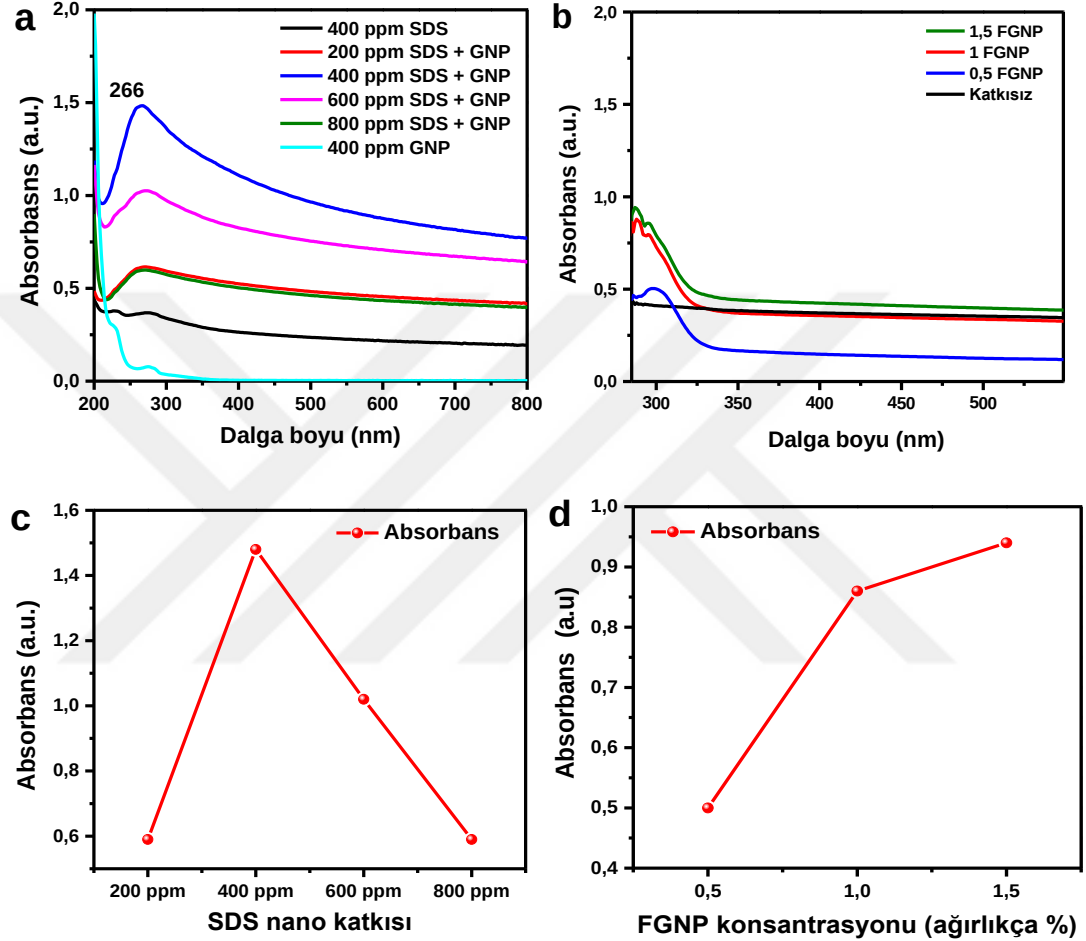
Bu kısımda FGNP katkılı CFRP nanokompozitlerine yapılan kimyasal karakterizasyon (UV-Vis spektroskopisi, FT-IR spektroskopisi), termal karakterizasyon (DSC spektroskopisi ve TGA spektroskopisi), elektriksel karakterizasyon (empedans spektroskopisi ve iki prop iletkenlik testi), mekanik karakterizasyon (çekme testi, darbe testi ve sertlik testleri), morfolojik karakterizasyon (SEM), FPI ve termografi (LT ve PT) kontrolü yapılmıştır.

5.2.1. UV-Vis Spektroskopi Sonuçları

SDS, grafen nanoplateletleri (GNP) dağıtmanın [239], stabilize etmenin ve işlevselleştirmenin etkili bir yoludur ve FGNP'nin dağılma yeteneği, UV-Vis spektroskopisi [59,62,90] kullanılarak analiz edilebilir. FGNP'nin EtOH içinde iyi dağılımı için optimum SDS konsantrasyonunu bulmak amacıyla, farklı SDS çözeltileri konsantrasyonlarına sahip UV-Vis spektroskopi GNP dağılımları ölçüldü. Şekil 5.6 (a)'da gösterilmektedirler. Karşılaştırma amacıyla SDS'nin ve GNP'nin de ayrı ayrı UV-vis absorpsiyon spektrumları ölçüldü. Grafen türlerinden beklendiği gibi, grafendeki karbonun çift bağının $\pi-\pi^*$ geçişine atfedilen maksimum absorbans zirvesi ~ 266 nm'de görüldü [31]. Şekil 5.6 (c)'de, yüksek SDS konsantrasyonunun (800 ppm) varlığında absorbans azalmıştır çünkü miseller, GNP'nin yüzeyine adsorbe edilmek yerine SDS miktarı fazla olduğunda oluşur. FGNP konsantrasyonu 400 ppm için 0,05 mg/ml olarak elde edildi.

GNP yüzeyinin SDS ile işlevselleştirilmesi sonucunda, Araldite LY5052 havacılık epoksi çözeltilerine ağırlıkça % 0,5 – 1 – 1,5 FGNP olmak üzere farklı ağırlık yüzdeleri eklenmiştir. Şekil 5.6 (b), üç farklı FGNP katkılı ve katkısız kompozitin UV-vis absorpsiyon spektrumlarını göstermektedir. Literatürle iyi bir uyum içinde, 280 nm dalga boyunda maksimum absorpsiyondan kaynaklanan keskin zirvenin, FGNP için karbonun $\pi-\pi$ geçiş çift bağı ile ilişkili olduğu ortaya çıktı. Ayrıca GNP'lerin katmanlı yapısından dolayı spesifik yüzey alanının daha geniş olması emilim değerini arttırmaktadır [240]. Epoksideki FGNP miktarı arttıkça absorbans yoğunluğu da arttı, bu da Araldite LY5052 havacılık epoksisinde FGNP'nin iyi dağılım davranışını ortaya

koyuyor. Sonuçlar literatürdeki çalışmalarla tutarlıydı [192]. Şekil 5.6 (d)'de görüldüğü gibi, FGNP konsantrasyonu arttıkça absorbansları da artar, bu da aralarındaki doğrusal ilişkiyi açıklar. Beer kanununa göre FGNP 'nin baz sıvıda iyi dağıldığını göstermektedir [240].



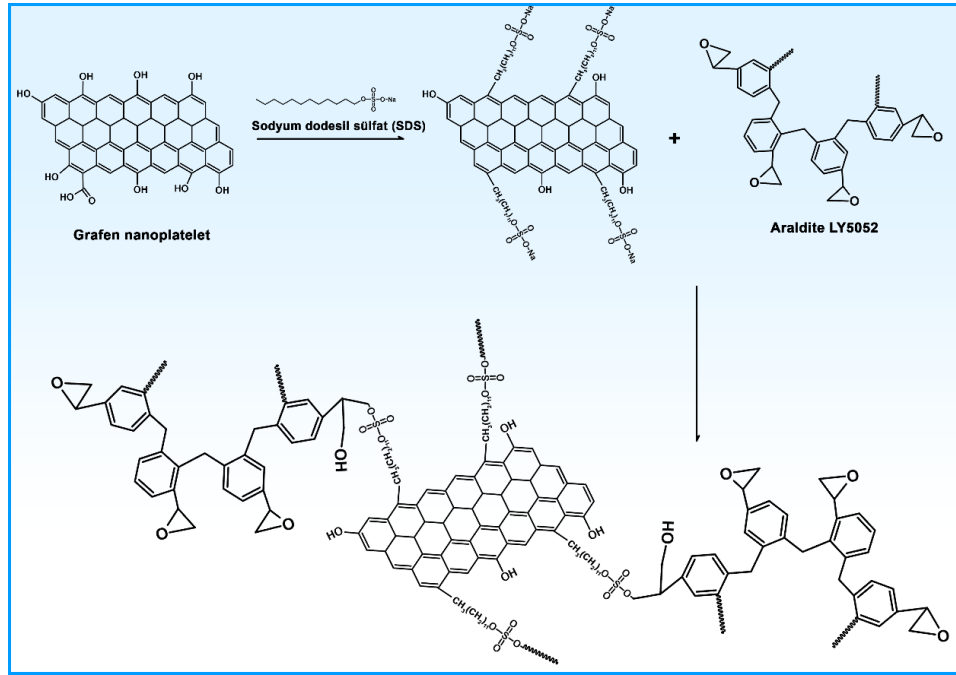
Şekil 5.6. SDS'li GNP'lerin (a), FGNP ilaveli epoksinin (b), SDS sürfaktanının (c) ve FGNP Konsantrasyonunun (d) UV-Vis absorbans spektrumları.

5.2.2. FT-IR Spektroskopi Sonuçları

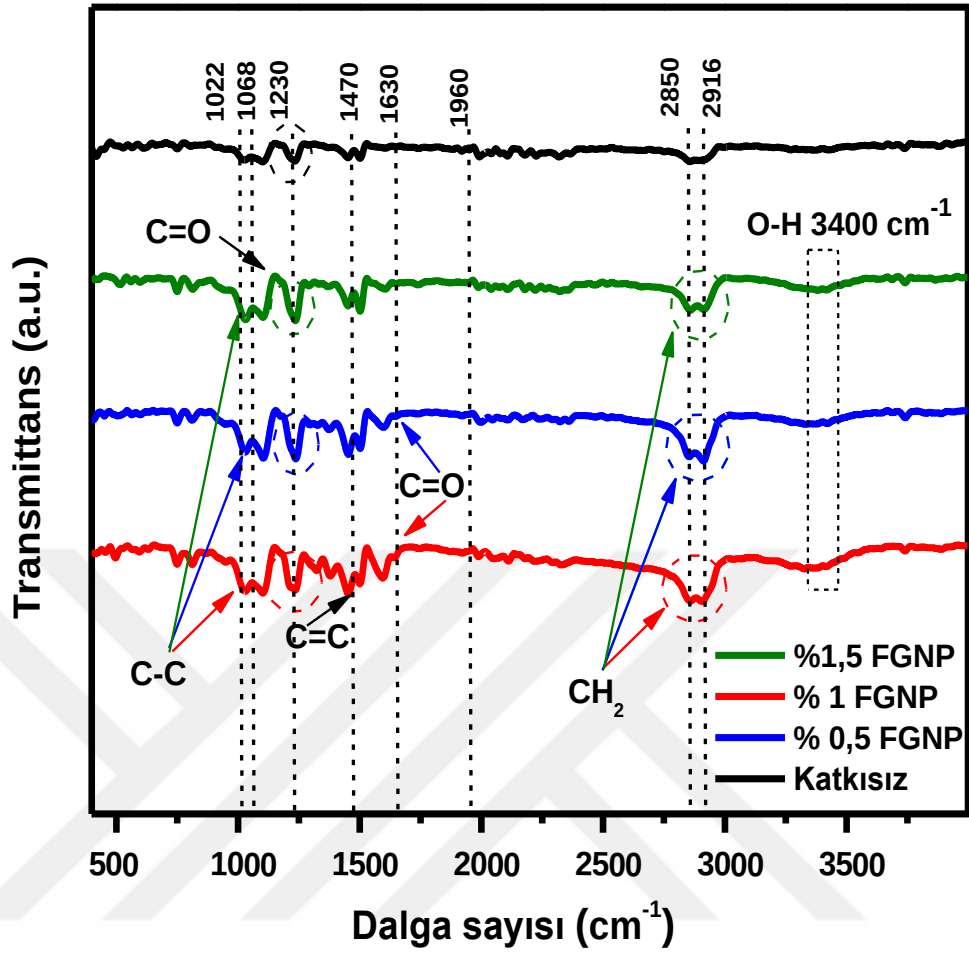
Kompozitlerin kimyasal yapısını anlamak için FT-IR spektroskopisinden yararlanıldı. Şekil 5.7 GNP, SDS ve epoksi matrisi arasındaki hidroksil (O – H), karbonil (C=O) ve diğer fonksiyonel grupları göstermektedir. Şekil 5.8 karbon fiberle güçlendirilmiş havacılık epoksi kompozitlerine eklenen ağırlıkça % 0,5 – 1 – 1,5 FGNP'lerin FT-IR spektrumlarını göstermektedir.

$\sim 3400 \text{ cm}^{-1}$ 'deki geniş zirve hidroksile (O-H) [91] atfedildi ve 2920 cm^{-1} ile 2850 cm^{-1} 'deki zirveler sırasıyla SDS'deki metilen ve metil CH_2 gerilme [241] titreşimlerine karşılık geldi. Ayrıca FGNP'lerin ve SDS'nin 1068 ve 1230 cm^{-1} spektrumlarındaki pikler sülfat (SO_4^{2-}) [241] gruplarının simetrik ve asimetrik gerilme titreşimleriyle ilişkilidir. Söz konusu pikler, katkılamayla daha belirgin ve yaygın hale gelmiştir. FGNP, SDS ile işlevselleştirildi.

1600 cm^{-1} ve 1022 cm^{-1} 'deki zirveler, sırasıyla SDS'nin fenil gruplarının [242] $\text{C}=\text{C}$ ve $\text{C}-\text{C}$ gerilme titreşimlerine atfedilmiştir. Ek olarak 1890 cm^{-1} 'deki pikler $\text{C}-\text{O}$ bağına atfedildi ve 1470 cm^{-1} 'deki pik ise $\text{C}=\text{C}$ bağına atfedildi [233]. Bu bant kayması, epoksi matrisi ile karbon fiber takviyesi arasında iyi bir etkileşimin olduğunu gösterir. 1230 cm^{-1} 'deki zirve karbonil grubuna ($\text{C}=\text{O}$) karşılık geliyordu [243]. 1630 cm^{-1} 'deki zirve, FGNP'nin $-\text{COOH}$ modifikasyonu sırasında oluşan karbonil grubuna ($\text{C}=\text{O}$) karşılık geliyordu. Bu zirve, epoksi reçinesi ile FGNP'lerin COOH grubu yüzeyleri arasındaki bir esterleşme reaksiyonunu gösterir. FT-IR sonuçları, FGNP katkılı havacılık epoksisinin kovalent bağlar yoluyla CF yüzeyine aşılandığını doğruladı.



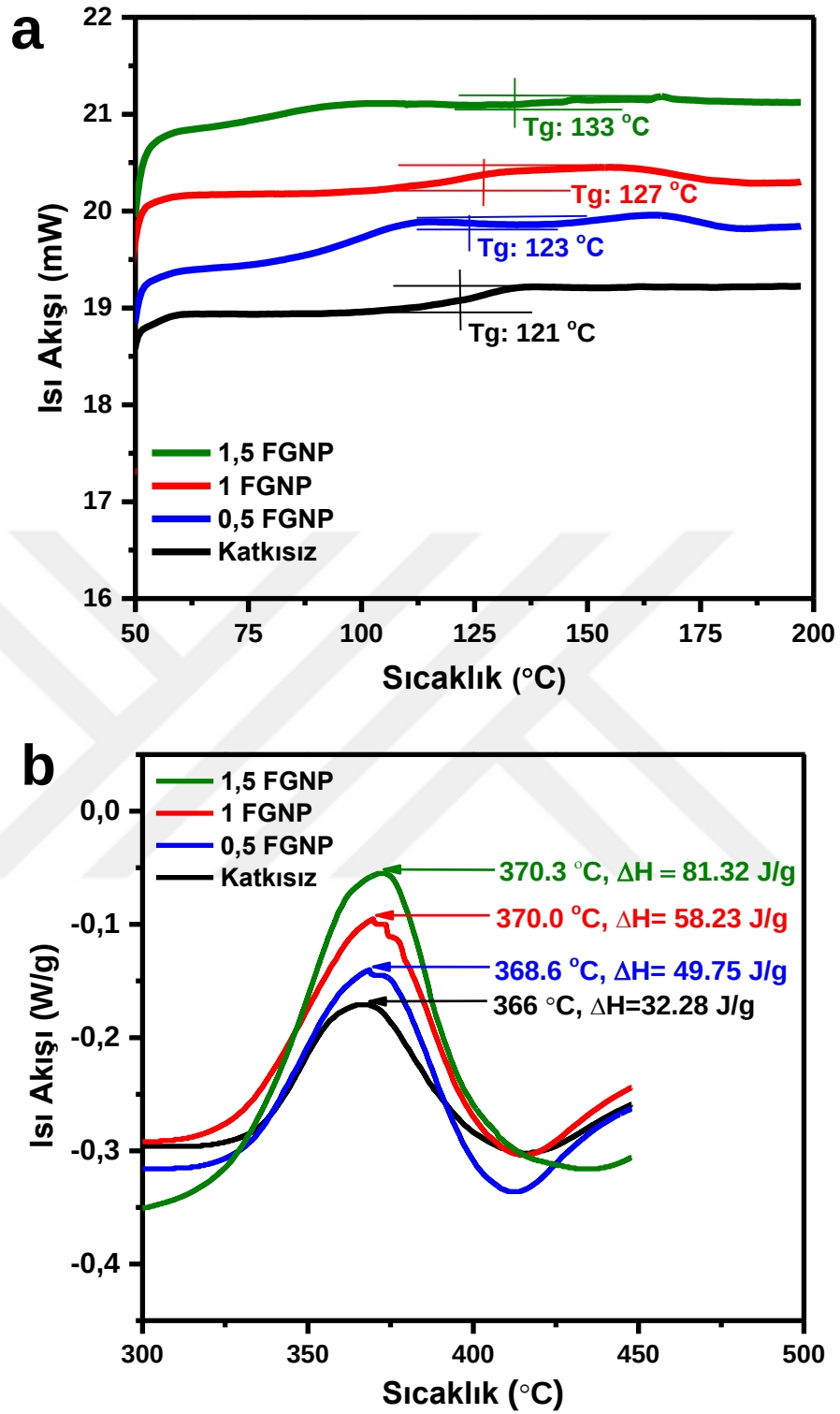
Şekil 5.7. GNP, SDS ve epoksi arasındaki bağlar ve kimyasal yapıları.



Şekil 5.8. FGNP katkılı nanokompozitlerin FT-IR spektrumları.

5.2.3. DSC Spektroskopi Sonuçları

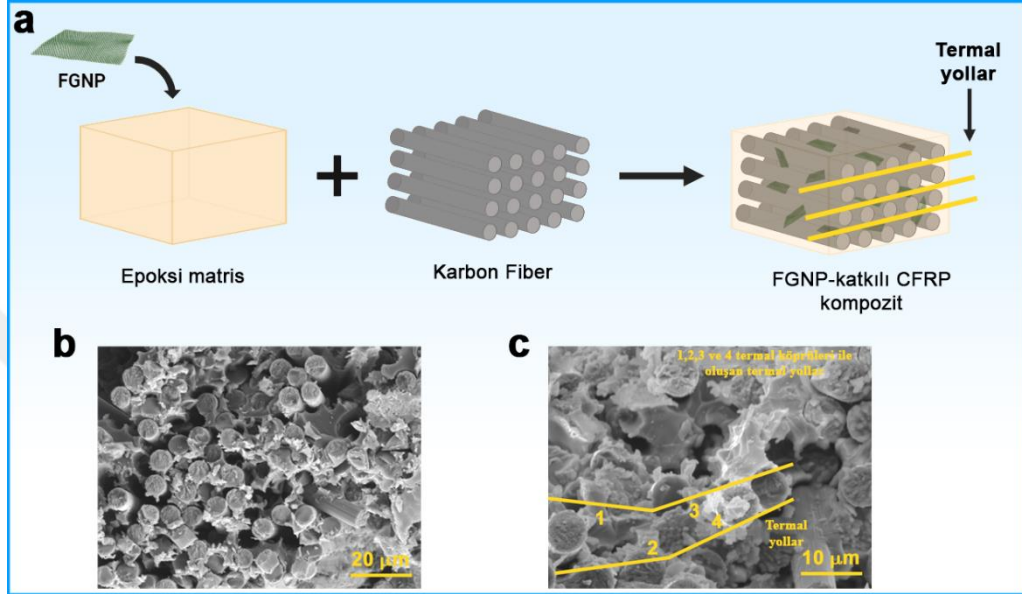
FGNP katkılı nanokompozitin termal davranışları DSC analizi kullanılarak araştırıldı. Şekil 5.9 (a), kompozit numunelerin DSC eğrilerini göstermektedir. Katkısız kompozit ve tüm nanokompozitlerde ölçülen sıcaklık aralığında erime veya kristalleşme olmadı. Kurlenmiş katkısız kompozit ve FGNP katkılı nanokompozitlerin T_g 'si, oda sıcaklığından 200 °C'ye kadar ısıtma-soğutma-ısıtma döngülerinin 2. ısı akış eğrisinden elde edildi. Katkısız kompozit ve 0,5 – 1 – 1,5 FGNP nanokompozitlerinin T_g 'leri sırasıyla 121 °C, 123 °C, 127 °C ve 133 °C olarak ölçülmüştür.



Şekil 5.9. FGNP katkılı nanokompozitlerin DSC eğrileri (a) ve erime tepe sıcaklıkları, erime entalpileri (b).

Açık literatürdeki diğer araştırmacılar, GNP katkısının termal iletkenliği arttırdığını belirlemiştir [99,244,245]. Polimer kompozitlerde ısı akustik fononlar şeklinde

aktarıldığından dolgu malzemesi, dağılım derecesi ve malzemenin kristal yapısı gibi faktörler ısı iletkenliği değiştirebilmektedir [246]. Termal köprülerin ve termal yollarının şekil 5.10'daki şematik gösterimi ve SEM görüntüleri FGNP katkısı kullanarak oluşturulmuştur.



şekil 5.10. FGNP katkısı ile oluşturulan termal köprülerin ve termal yolların şematik ve SEM görüntüleri.

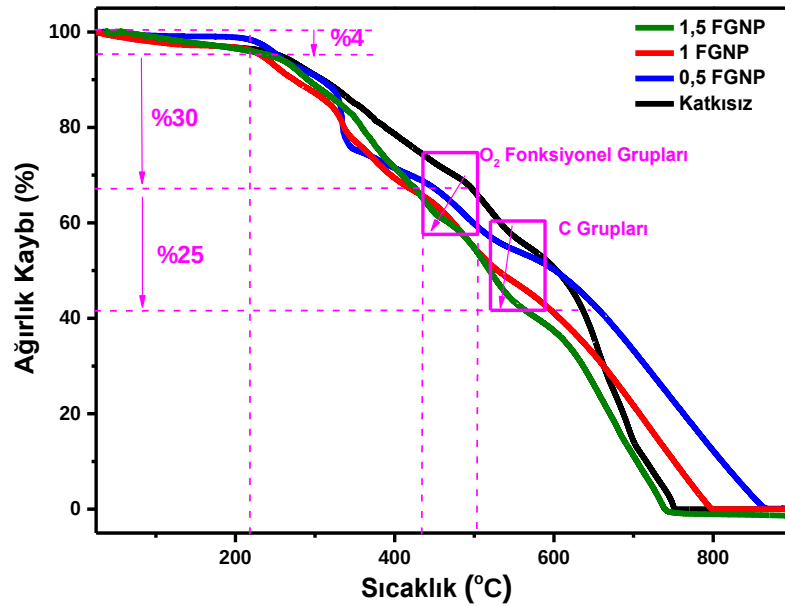
FGNP katkılması ile T_g 'deki artış, katkılama nedeniyle artan daha yüksek çapraz bağ yoğunluğuna bağlanabilir. şekil 5.10 (a)'da ve 5.10 (c)'de görüldüğü gibi FGNP, fiber ve matris arayüzünde termal köprüler oluşturarak, ısı akışını kolaylaştıran termal yollar oluşturur [98]. şekil 5.10 (b)'de katkısız kompozitin SEM görüntüsünde arayüzeydeki boşluklar açıkça görülmektedir.

Polimer kristalleşmesi, erime sıcaklığı, ayrışması ve entalpisi (ΔH) hakkında bilgi elde etmek için daha yüksek sıcaklıklarda (450 °C) DSC karakterizasyonları kullanıldı. şekil 5.9'daki DSC termogramlarından önemli bir bulgu elde edildi, çünkü nanokompozitlerde hem erime tepe sıcaklıkları hem de erime entalpisi arttı. Katkısız kompozit ve 0,5 – 1 – 1,5 FGNP nanokompozitleri için erime tepe sıcaklıkları sırasıyla 366 °C, 368 °C, 370 °C ve 370,3 °C'dir. Erime entalpileri sırasıyla 32,28J/g, 49,75 J/g, 58,23 J/g ve 61,32 J/g olarak ölçüldü. Katkısız kompozit ile karşılaştırıldığında nanokompozitlerde FGNP katkı maddesi miktarı arttıkça erime tepe sıcaklığı ve

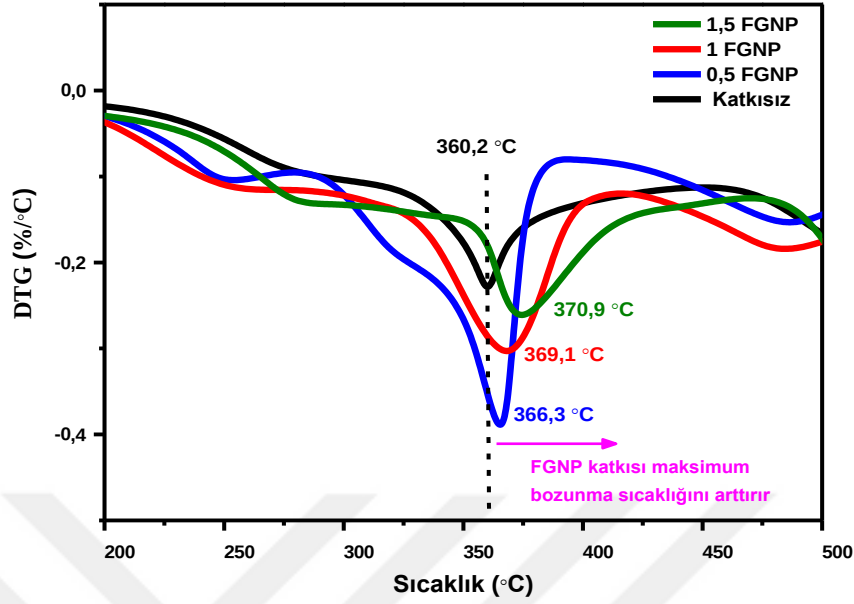
entalpi değerlerinin arttığı görülmüştür. Yüksek yüzey alanına sahip GNP'ler çapraz bağlanma reaksiyonlarını artırır ve GNP'lerin yüzeyi şekil 1.2. (b)'deki gibi işlevselleştikçe, daha güçlü π - π bağları ve epoksi ile daha güçlü hidrojen bağları oluştururlar [247] ve erimeyi geciktirirler. Ayrıca FGNP nano katkısı ile ayrışma sıcaklığının artması, FGNP nano katkısının homojen dağılımına ve dispersiyonuna bağlanmaktadır. Öte yandan, 1 FGNP ile 1,5 FGNP arasında erime sıcaklığı veya erime entalpisinde önemli bir artışın olmaması, yeniden aglomerasyonun başlangıcına atfedildi [101].

5.2.4. TGA Spektroskopisi Sonuçları

Farklı katkı oranlarına sahip nanokompozitlerin hava ortamındaki termal uyarım sırasında karşılaştığı fiziksel değişiklikler, TGA analizi kullanılarak geniş çapta incelenmiştir. FGNP katkılı CFRP nanokompozitleri için elde edilen tipik TGA grafiği Şekil 5.11'de gösterilmektedir. Farklı dolgu oranlarına sahip nanokompozitlerin 215 ± 5 °C'ye kadar stabil olduğu ve TGA eğrilerinin neredeyse örtüştüğü görülmektedir. Bu durum katkı oranının 250 °C'ye kadar olan sıcaklıklarda termogravimetrik özellikler üzerindeki etkisinin çok küçük olduğu anlamına gelir.



Şekil 5.11. Katkısız kompozit ve FGNP katkılı nanokompozitlerin ağırlık kaybı TGA eğrisi.



Şekil 5.12. Katkısız kompozit ve FGNP katkılı nanokompozitlerin DTG eğrisi.

Tüm numuneler için yaklaşık 215 °C'ye kadar olan zor ağırlık değişiklikleri (%4), kütleme işlemi sırasında giderilemeyen ortam neminden kaynaklanmaktadır. 215°C'den sonraki aşamada % 30'luk kütle kaybı yaşandı. 350 °C ile 400 °C arasındaki hızlı kütle kayıpları, epoksinin erime noktasına ulaşan termal oksidasyonundan [248] kaynaklanmaktadır. 440 °C ile 505 °C arasındaki kütle kayıpları ise daha kararlı oksijen içeren [249] fonksiyonel grupların ortadan kaldırılmasından kaynaklanmaktadır. Nanokompozit içerisindeki FGNP nano katkı maddesi miktarı arttıkça oksijen fonksiyonel grupları da artmaktadır. Bu nedenle FGNP nano katkısının miktarı arttıkça daha düşük sıcaklıklarda bozunma başlamıştır. 500 °C'den sonraki aşamada meydana gelen %25'lik kütle kaybı, özellikle 545 °C ile 560 °C arasında GNP yapısındaki kararsız karbon gruplarının [250,251] ayrışmasından kaynaklanmaktadır. Bu sıcaklıklarda katkı maddesi sayısı arttıkça bozunma sıcaklığının düşmesi, bir karbon allotropu olan GNP miktarı arttıkça nanokompozit içindeki karbon gruplarının artmasından kaynaklanmaktadır. Sonuç olarak havacılıkta kullanılmak üzere üretilen FGNP katkılı CFRP nanokompozitlerinin uygulama için yeterli olan yaklaşık 215 °C'ye kadar stabil olduğu gözlemlenmiştir. Uçak uçuş kumanda yüzeylerinin maruz kaldığı en yüksek sıcaklıklar yaz aylarındaki havalimanı sıcaklıklarıdır.

Çizelge 5.1. Katkısız kompozit ve FGNP katkılı nanokompozitlerin termal ayrışma sıcaklığı.

FGNP-katkılı nanokompozitler	FGNP katkısı (%)	Bozunma başlangıcı sıcaklığı (T_i)/°C	Maksimum bozunma sıcaklığı (T_m)/°C
Katkısız kompozit	0	311,79	360,20
0,5 FGNP	0,5	317,82	366,30
1 FGNP	1	330,50	370,09
1,5 FGNP	1,5	339,45	370,96

Ayrıca, Şekil 5.12’de gösterildiği gibi, katkısız kompozitlerin başlangıç bozunma sıcaklıkları (T_i) ve maksimum bozunma sıcaklığı (T_m) de FGNP katkısıyla bir miktar iyileştirilmiştir. T_m 1,5 FGNP nanokompozitinde katkısız kompozite göre 10,76 °C daha yüksektir. FGNP katkısının termal bozunma sıcaklıkları üzerindeki etkisi Çizelge 5.1’de özetlenmiştir. Bozunma sıcaklığındaki bu iyileşmeler, FGNP’nin eğimli bir yola neden olan [252] ve dolayısıyla bozunmayı geciktiren [253] katmanlı yapısına atfedilebilir. Aynı zamanda FGNP’deki hidroksi grupları [254] kütleme reaksiyonuna katılır ve daha yüksek bir çapraz bağlanma [255] yoğunluğu yaratarak termal stabiliteyi geliştirir.

5.2.5. Empedans Spektroskopisi Sonuçları

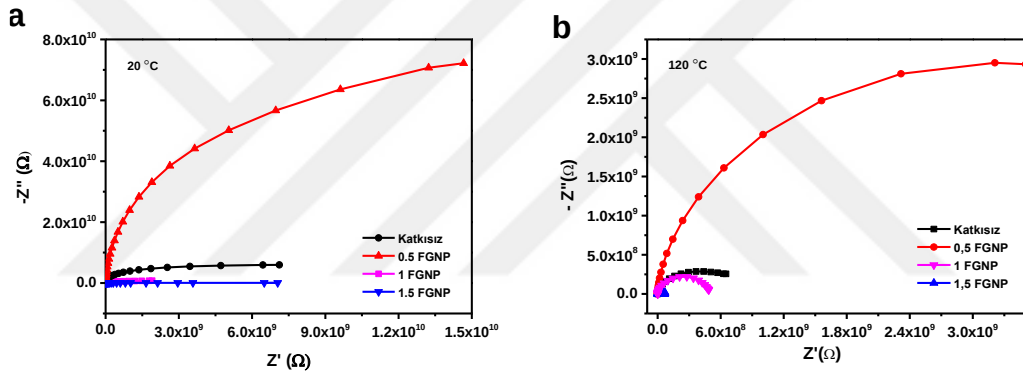
Empedans spektroskopisi katkısız kompozit ile karşılaştırmalı olarak FGNP miktarına bağlı olarak elektrik direncinin değişimini göstermektedir.

Şekil 5.13.’te empedans spektroskopisi ölçümleri 20 °C’de (a) ve 120 °C’de (b) yapılmıştır. Bilindiği gibi empedans spektroskopisi frekansın bir fonksiyonu olarak elektrik empedansını ölçer. Elektriksel polarizasyon süreçlerini gevşeme frekanslarına veya zaman sabitlerine göre analiz eder.

Şekil 5.13. (a)’da görüldüğü gibi katkısız kompozit ile katkılı kompozitlerde tam Nyquist diyagramı eğrileri oluşmadı, ancak 0,5 FGNP nanokompozitinin analizi yarım daire şeklinde bir eğri oluşturdu. FGNP konsantrasyonu arttıkça bu yarım dairelerin çapı azalır, bu durum polimer matrisinde oluşan daha iletken zincirler nedeniyle kompozit numunelerin daha düşük elektrik direncini gösterir. 0,5 FGNP nanokompoziti tüm sıcaklıklarda Nyquist diyagramı eğrilerinin çapını arttırarak daha

yalıtkanlaşmış görünmektedir, ancak 1 FGNP ve 1.5 FGNP nanokompozitlerinde Nyquist diyagramı eğrilerinin çapı azalmış dielektrik sabitleri düşmüştür. FGNP katkısının artmasıyla yarım dairelerin daha küçük Z' 'ye dönüştüğü görülmüştür. Şekil 5.13. (b)'de sıcaklığın 120 °C'ye ulaşması ile dielektrik daha da azalmıştır ve 1 FGNP ile 1,5 FGNP süper iletken davranışı sergilemişlerdir.

Fonksiyonlaştırma işlemi ile FGNP'lerin yüzeyinde oluşan oksijen grupları FGNP'nin sp^2 ağ yapısını bozmuşlardır ve voltaj eşik değerini (percolation threshold) arttırmışlardır, dolayısıyla iç iletkenliği azaltmışlardır. Oksitlenme FGNP tabakaları arasında enerji bariyerini arttırarak anahtarlama voltajını yükseltmişlerdir [232–234]. Ağırlıkça % 1 FGNP katkısından sonra voltaj eşik değeri azaldığı için anahtarlama voltajı düşerek üretilen nanokompozitin dielektrik katsayısı azalmıştır.

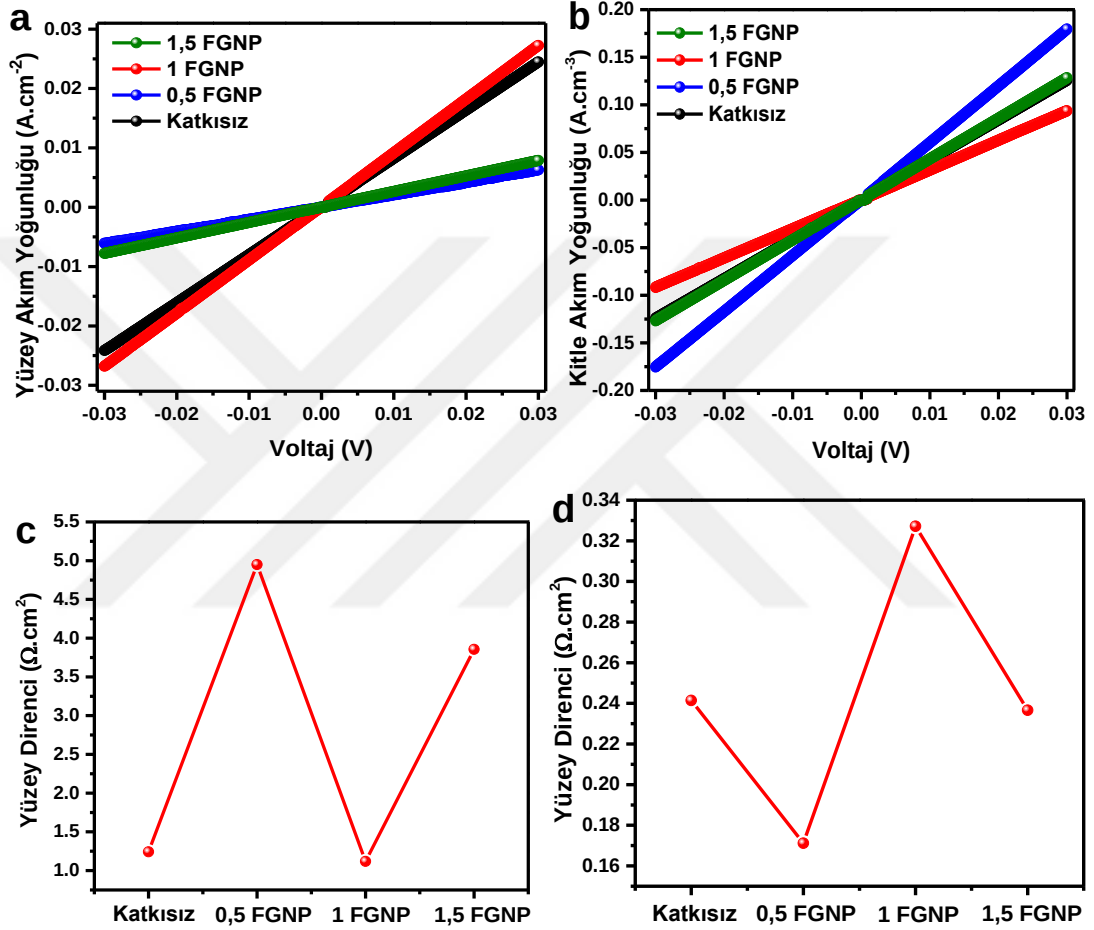


Şekil 5.13. FGNP katkılı nanokompozitlerin empedans (Z'' - Z') spektroskopisi ölçümleri 20°C (a) ve 120°C (b).

5.2.6. İki Prop Elektrik İletkenliği Sonuçları

Şekil 5.14 nanokompozitlerin I-V yöntemiyle elektriksel karakterizasyonunu göstermektedir. Burada -0,03 V'den 0,03 V'ye kadar 0,0001 V aralıklarla ölçümler alındı ve bu ölçüme ait veriler çizildi. Temas alanları ölçüldü. Dolayısıyla grafiklerin dikey eksenleri $A.cm^{-x}$ cinsindendir. Yüzey direnci için tüm işlemler tekrarlandı. Ancak yüzey direnci dediğimiz ifadede numunenin parlak yüzeyi alınarak elektriksel kontaklar yapılmış ve kontaklar arası mesafe 1 cm olarak ayarlanarak ölçülmüştür.

Şekil 5.14 (a)'da kitle akım yoğunluğuna göre, katkısız kompozit 0,03 V'da 0,12 A. cm^{-3} akım yoğunluğuna sahipken 0,5 FGNP nanokompozitinde %50'lik bir iyileşme ile 0,18 A. cm^{-3} akım yoğunluğuna sahiptir. Yüzey akım yoğunluğu ile ilgili olarak şekil 5.14 (b)'de katkısız kompozitin akım yoğunluğu 0,03 V'da 0,024 A. cm^{-2} 'dir ve 1 FGNP nanokompozitin akım yoğunluğu %18'lik artışla 0,028 A. cm^{-2} 'dir.



Şekil 5.14. Nanokompozit numunelerin I-V yöntemiyle elektriksel karakterizasyonu, yüzey akım yoğunluğu (a), kitle akım yoğunluğu (b), yüzey direnci (c) ve kitle direnci (d).

FGNP'lerin üzerinde oluşan fonksiyonel oksijen grupları, GNP sp^2 ağ yapısını bozarak iç iletkenliği azaltır. GNP yapısındaki oksijen miktarının artırılması iletkenliği azaltır, çünkü oksijen voltaj eşik değerini artırır [232]. Oksijen gruplarının veya diğer fonksiyonel grupların grafen katmanları arasındaki teması enerji bariyerini artırır ve nanokompozitin anahtarlama voltajı [233] artar. Yüzeyi aktive etmek için kullanılan SDS sürfaktanının grafen katmanlarına bağlanan hidrofilik kafasında [234] -O ve =O

bağlarının varlığı, voltaj eşik değerini artırarak anahtarlama voltajını da arttırır. Şekil 5.14 (c)'de verilen küçük katkı değerlerinde yüzey direncindeki artış, eşik değerindeki artışa bağlandı. Şekil 5.14 (d)'de verilen % 1 katkı değerindeki hacim direncindeki artış, sp^2 ağ yapısını bozan grafen katmanları arasındaki artan oksijen gruplarına bağlanmaktadır. GNP katmanlarının sayısının arttırılması, bu katmanlar arasındaki kovalent bağlardan [256] dolayı iletkenliği azaltır.

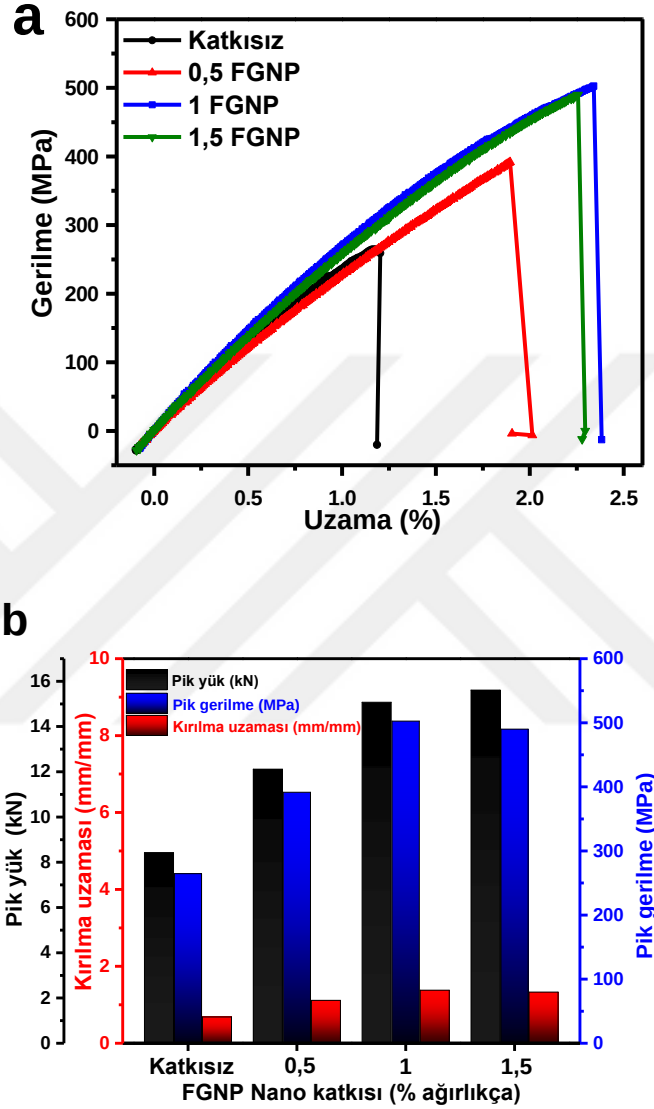
Ayrıca GNP'lerin kalınlığının fazla olması [257] da iletkenliği azaltır. Bu çalışmada kullanılan GNP 5 nm kalınlığında olup 4 katmandan oluşmaktadır. Literatürde daha yüksek elektriksel iletkenliğe sahip çalışmalarda daha ince [76,258–260], daha az katmanlı [76,260] ve daha az oksijen içeren [106,259] GNP kullanılmıştır.

5.2.7. Çekme Testi Sonuçları

Geliştirilen nanokompozitlerin çekme testi sonuçları Şekil 5.15 (a)'da ve Çizelge 5.2'de verilmiştir. Bu sonuçlar 264,5 MPa gerilim altında kopma ve 1,161 mm/mm uzama göstermiştir. 0,5 FGNP nanokompozitinde 391,6 MPa gerilim altında kopma ve 1.895 mm/mm uzama meydana geldi. 1 FGNP nanokompozitin 502,5 MPa gerilim altında kopma ve 2,341 mm/mm uzama gösterdiği, 1.5 FGNP nanokompozitin ise 490 MPa gerilim altında kopma ve 2,257 mm/mm uzama gösterdiği gözlemlendi.

Çekme mukavemetinin FGNP konsantrasyonuyla arttığı tespit edilmiştir. 1 FGNP nanokompozitinde çekme dayanımının maksimum seviyeye ulaştığı görülmektedir. Şekil 5.15 (b)'den ve Çizelge 5.2'den, FGNP'nin ağırlıkça % 1,5'a kadar arttıkça pik kuvvetin arttığı açıktır. Bunun nedeni düşük FGNP konsantrasyonunun FGNP'nin epoksi içinde iyi bir dağılımına neden olması ve sonuç olarak, nano-modifiye epoksi ile karbon fiberin tatmin edici şekilde ıslatılmasına yol açmasıdır. Böylece epoksi matrisine nanopartiküllerin eklenmesi karbon fiber ile matris arasındaki yapışmayı arttırır. İyi fiber-matris yapışması, karbon fiber ve epoksi matris arasında yük aktarımına izin verir [261]. Ayrıca şunu da belirtmek gerekir ki FGNP yığılmaları kırılma noktası olsa da 490 MPa gerilim altında 2.257 mm/mm uzama. Çekme mukavemeti ve ofset akma geriliminin FGNP konsantrasyonuyla arttığı bulunmuştur. Çekme mukavemeti 1 FGNP nanokompozitlerde maksimum seviyeye ulaştı. Şekil

5.12 (b)'den ve çizelge 3'ten, FGNP'nin ağırlıkça miktarı % 1,5'a kadar arttıkça $P_{yük}$ 'ün arttığı açıktır. Nanokompozitin uzaması, kopma gerilimi ve gerilim dengeleme verimi, nano katkı maddelerinin eklenmesiyle her zaman azalmaz [262].



Şekil 5.15. FGNP katkılı CFRP nanokompozitlerinin çekme mukavemeti (a) ve pik yük, pik gerilme ve kırılma uzaması grafiği (b).

Genel olarak katkısız kompozit ile karşılaştırıldığında nanokompozitlerin çekme özellikleri iyileştirilmiştir [79,80]. Bu artışlar FGNP'nin epoksi matrisindeki güçlü nano katkı etkisini göstermektedir.

Çekme testi altında artan FGNP yüklemesi ile FGNP katkılı nanokompozitlerin tipik gerilim-gerinim davranışını gösterir. FGNP katkılı nanokompozitler, yükte ani bir

düşüş ve pik yüke ulaştıktan sonra yükte bir azalma ile gösterilen kırılma bir kırılma gösterirken, katkısız kompozit biraz daha sünek bir davranış sergiledi.

Araştırmacılar yaptıkları çalışmalarda ağırlıkça % 0,5 [86], % 0,3 [87] ve % 1 [88] gibi düşük GNP katkı maddelerinin epoksi matris içerisinde etkili bir şekilde dağılabileceğini ve maksimum çekme mukavemetinin sırasıyla %10, %25 ve %5 arttırılabileceğini göstermişlerdir. Bununla birlikte, GNP'nin işlevselleştirilmesiyle ağırlıkça %1'e kadar FGNP eklenebilmektedir ve çekme mukavemeti, katkı maddesi içermeyen kontrol numunesine kıyasla %92 oranında iyileşmiştir.

FGNP ilavesini % 1'den fazla yapılması ise FGNP'nin yeniden yığılmasına ve topaklanmalara yol açar, dolayısıyla nanokompozitlerin nano katkı verimliliğini doyurur. Bununla birlikte FGNP eklenmesiyle nanokompozitlerin çekme modülleri performansındaki artış, nanokompozitlerdeki FGNP sert katkısının elastik deformasyona direnç gösterdiğini göstermektedir.

Çekme mukavemetindeki artış FGNP'nin daha iyi dağılıbilirliğine ve mükemmel yük taşıma kapasitesine bağlandı. Karışım sırasında doyma noktasına ulaşan nano katkı ilavesinin mukavemeti ve gerilimi arttırdığı sonucuna varılmıştır [86,263].

FGNP'lerin düzgün dağılımı fiber ve matris arasında köprü kurarak mekanik kilitleme mekanizmasını geliştirir. Bu mekanizma kompozitin çekme gerilmeleri sırasında yük taşıma yeteneğini artırır. Gerilme sırasında üçüncül kompozit sistemdeki en düşük modüllü bileşen olan matris ilk önce çatlamaya başlar. Yük daha sonra mekanik kilitleme sistemi nedeniyle bir köprü etkisi ile FGNP'ler tarafından matristen yüksek modüllü takviye fiberine aktarılır. Böylece arafazda kompozitlerin enerji soğurma kapasitesi artar ve nanokompozitin dayanıklılığı artar.

Katkısız kompozit ve FGNP katkılı CFRP nanokompozitlerin çekme özellikleri Çizelge 5.2'de gösterilmektedir. 1 FGNP nanokompozitlerde, matristeki FGNP'ler çekme testi sırasında gerinim enerjisini absorbe ettiğinden, çatlak oluşumu ve yayılma gecikmesinden dolayı hasar stresi daha yüksektir. Çizelge 5.2'de, 1.5 FGNP'de çekme mukavemetindeki azalma, epoksi içinde homojen olarak dağılmış FGNP'lerin π - π kuvvetlerinin yeniden topaklanma eğiliminden kaynaklanmaktadır. FGNP kümeleri:

FGNP'nin topaklanma oluşturma eğiliminin, birbirlerine yaklaştıklarında aralarındaki van der Waals çekim kuvvetinden kaynaklandığı düşünölmektedir. Aglomeralar karbon fiber ve epoksi matris arasında daha zayıf arayüzey etkileşimine neden olmuştur, fiber ve matris arasındaki boşluklar gerilme farklılıklarına, süreksiz gerilmelere ve hızlı çatlak yayılmasına neden olarak mukavemeti düşörmüştür.

Çizelge 5.2. Katkısız kompozit ve FGNP katkılı CFRP nanokompozitlerinin çekme özellikleri.

Tanım	FGNP Katkısı (%)	Pik Kuvvet (kN)	Pik Stres (MPa)	Uzama (mm/mm)	Akma Dayanımı (MPa)
Katkısız	0	8.425±2.01	264.5±21.19	1.161±0.20	250.541±7.30
0,5 FGNP	0,5	12.114±2.15	391.6±19.91	1.895±0.25	291.604±12.03
1 FGNP	1	15.073±0.68	502.5±11.01	2.341±0.12	312.232±6.51
1,5 FGNP	1,5	15.508±1.31	490.0±12.05	2.257±0.12	325.666±7.93

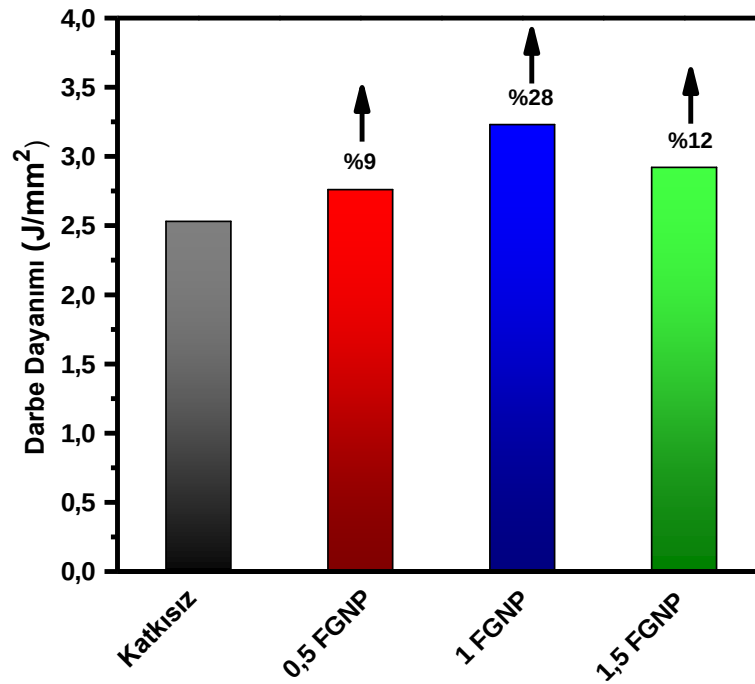
5.2.8. Darbe Testi Sonuçları

şekil 5.16'da gösterilen FGNP katkı maddeleri içeren nanokompozitler katkısız kompozitlerden daha iyi mekanik özellikler gösterdi, çünkü FGNP ve epoksinin fonksiyonel grupları arasındaki reaksiyon, epoksi ve karbon arasındaki arayüzü güçlendirerek nanokompozitin mekanik özelliklerini geliştirdi. FGNP parçacıklarının matris içindeki homojen dağılımı, matristen liflere daha iyi yük aktarımı sağlar, emilen enerjiyi ve tokluk değerlerini arttırır [264].

Katkısız kompozitlerin darbe mukavemeti 2,50 J/mm² iken 0,5 – 1 – 1,5 FGNP nanokompozitlerin sırasıyla 2,76 J/mm², 3,23 J/mm² ve 2,83 J/mm² olduğu görölmüştür. En iyi sonuç, % 28 iyileşmeyle 1 FGNP nanokompozitinde oldu. Darbe mukavemetindeki iyileşme FGNP'lerin darbe enerjisini katmanlar arasında absorbe etme ve dağıtma kabiliyetine atfedildi. Bu durum FGNP konsantrasyonunun artmasıyla enerji emme performansının arttığını gösterir [264]. FGNP'ler çarpma sırasında başlayan mikro çatlakları önleyebilir, saptırabilir ve daha fazla darbe enerjisi emilimi sağlar [265].

Ancak 1,5 FGNP nanokompozitlerinde iyileşmenin devam etmediği gözlemlenmiştir, bu da FGNP ilavesinin doygunluğa ulaştığını göstermektedir. Yüksek FGNP konsantrasyonu, yarattığı topaklanma nedeniyle stres konsantrasyon noktalarını başlatır [105]. Güçlü arayüzey bağlantısı tek başına her zaman tatmin edici bir genel performansa yol açmayabilir. Ara yüzey gücünde rapor edilen iyileşmeye genellikle dayanıklılıkta bir azalma eşlik eder.

Sıkıca bağlanmış ancak sert bir arayüz genellikle ara fazda yüksek stres aktarımına yol açar. Güçlü arayüz, stresi doğrudan matristen karbon fibre aktarabilir ve bu da kırılma bir yapıya neden olur. Nanokompozitte ağırlıkça daha fazla FGNP kullanılması, daha az epoksi kullanıldığı ve daha fazla FGNP ilavesiyle matrisin esnekliğinin azaldığı şeklinde yorumlanabilir. Bu çalışmanın amaçlarından biri eklenebilecek optimum FGNP miktarının belirlenmesidir. Şekil 5.17'deki sertlik testi sonuçlarının da doğruladığı gibi, daha fazla ağırlıkça % 1'den fazla FGNP eklenmesi sertliği artırsa da kırılma da artırır. Esnekliğini kaybeden matris arayüzü, gelen darbe kuvvetlerini absorbe etme özelliğini kaybetmiş ve bunu doğrudan CF'lere aktarmıştır. Çatlak başlangıcı ve kırılma daha küçük darbe kuvvetlerinde meydana geldi.



Şekil 5.16. FGNP katkılı CFRP nanokompozitlerinin darbe dayanımı.

Açık literatürde GNP nano katkısının darbe dayanımı üzerindeki etkisi incelendiğinde, araştırmacılar tarafından yapılan iki farklı çalışmada ağırlıkça % 1 ve % 0,1 GNP nano katkısının sırasıyla maksimum % 10 [88] ve % 14,5 [266] iyileşme sağladığı görülmüştür. Ancak bu çalışmada, ağırlıkça % 1 FGNP ilavesiyle nanokompozitte % 28 darbe dayanımı iyileşmesi görülmüştür.

Ağırlıkça % 1 FGNP eklense bile topaklanmanın henüz başlamadığı SEM görüntüleri ile doğrulandı. FGNP'nin bu avantajı matris ve epoksi arasında daha güçlü bir arayüz bağının oluşturulmasına bağlanabilir.

Ağırlıkça %1'den fazla FGNP katkılı CFRP nanokompozitinin darbe dayanımı değerindeki azalma, topaklanmanın oluşmasına, homojenliğin azalmasına ve zayıf dispersiyona bağlanabilir. Darbe testi sonuçlarına göre 1,5 FGNP nanokompozitteki azalma Şekil 5.6.'da verilen UV-Vis sonuçlarıyla doğrulandı. Aglomera FGNP'ler Şekil 5.19. (l)'de görüldüğü gibi fiber-matris arayüzünde boşluklar oluşturdu ve Şekil 5.19. (j)'de görüldüğü gibi çatlak darbe kuvvetinin daha rahat ilerlemesi için potansiyel bir yol oluşturdu.

5.2.9. Sertlik Testi Sonuçları

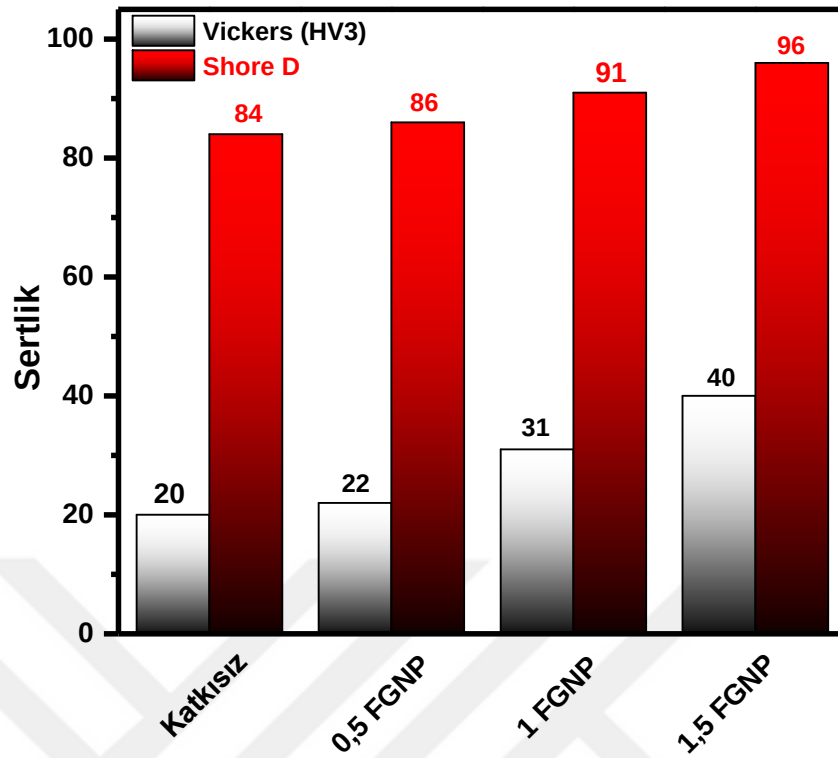
Şekil 5.17'de katkısız kompozit ve farklı ağırlık yüzdelere sahip FGNP katkılı nanokompozitlerin Vickers (HV3) sertlik değeri siyah sütunlarda, Shore D sertlik değeri ise kırmızı sütunlarda gösterilmiştir. Numunelerin dört farklı noktasından yapılan ölçümlerin ortalaması alınmış ve her numunedeki dört ölçüm değeri birbirine çok yakın çıkmıştır.

Katkısız kompozit, 0,5 – 1 – 1,5 FGNP için HV3 sertlik değerleri sırasıyla 20, 22, 32 ve 40 olarak ölçüldü. Shore D sertlik değerleri sırasıyla 84, 86, 91 ve 96 olarak ölçüldü. FGNP'lerin eklenmesi kompozitlerin sertliğini arttırdı. Şekil 5.14. nanokompozitlerde FGNP'nin ağırlıkça miktarının % 1,5'a kadar artmasıyla sertlik değerinin arttığını göstermektedir. Her iki sertlik testinde de FGNP nano katkısı ilavesiyle sertlik

değerinin arttığı görülmüş ve ağırlıkça 1,5 FGNP nanokompozitte maksimum sertlik değerleri görülmüştür.

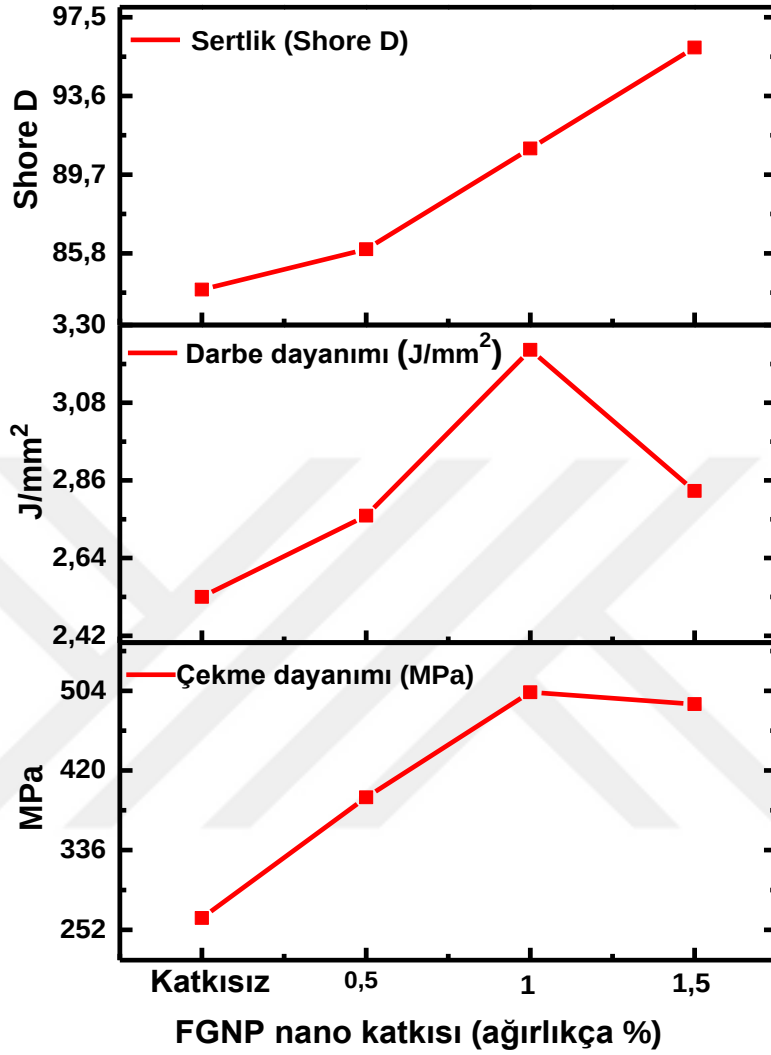
FGNP katkısı ile sertlik değerindeki artış, FGNP'lerin hidroksil ve karbonil grupları ile epoksi reçinesi arasındaki hidrojen bağına bağlanabilir [267]. FGNP katkısı miktarının artırılmasıyla nanokompozitin çapraz bağlanma yoğunluğu bağlanma mukavemetini ve yüzey dokusunu iyileştirir. Sertlik ve kırılabilirliği de artırır. FGNP parçacıkları reçine ile güçlü çapraz bağ yoğunluğu oluşturmuş ve nanokompozitlerin mukavemetini ve sertliğini arttırmıştır [268].

Literatürde, maksimum ağırlıkça % 0,7 GNP katkılı nanokompozitlerin Rockwell E sertlik ölçümlerinin sonuçları, katkısız kompozitten daha düşüktür [86]. Araştırmacılar, saf grafen (PG), grafen oksit (GO) ve indirgenmiş grafen oksitten (rGO) oluşan farklı katkı maddelerinin, grafenin gelişmiş mekanik özelliklerine atfedilen katkısız kompozite kıyasla sertliği arttırdığını bulmuşlardır [81,269]. FGNP'lerin ağırlıkça % miktarı arttıkça, dolgu parçacıkları fiber takviyesi ile epoksi matris arasındaki boşlukları doldurarak daha kalın bir malzeme [270] oluşturdu ve Şekil 5.17'de verildiği gibi sertliği arttı. Sertliğin artması kırılabilirliğide arttırdı. Kırılabilirliği artmış 1,5 FGNP nanokompoziti, 1 FGNP nanokompozitinden daha küçük çekme ve darbe kuvvetlerinde hasar görmüştür. Dolayısıyla 1,5 FGNP nanokompozitin çekme ve darbe dayanımı 1 FGNP nanokompozite göre azalırken, sertlik değeri arttı.



Şekil 5.17. FGNP katkılı CFRP nanokompozitlerinin sertlik değeri.

Karşılaştırmalı sertlik değerleri ve diğer mekanik testlerin (çekme ve darbe testleri) sonuçları şekil 5.18’de verilmiştir. Şekil 5.18’de görüldüğü gibi FGNP ilave miktarının artmasıyla sertlik değeri de artmaktadır. Ancak FGNP ilavesi ağırlıkça % 1’e kadar darbe ve çekme dayanımları artarken, FGNP miktarı % 1,5’a arttırıldığında darbe ve çekme dayanımları azalmaktadır. Her ne kadar mekanik test sonuçları ağırlıkça % 1 FGNP değerinde zirve yapsa da muhtemelen % 1,5 FGNP değerinde yeniden istifleme [271] ve topaklanma etkisi [272] nedeniyle azalıyor. Ancak Vickers veya Shore sertlik ölçümlerinden görüldüğü gibi FGNP yığınları daha kalın nanokompozitler oluşturdukları için sertliği arttırmıştır. Çekme ve darbe testi sonuçları, ağırlıkça % 1 FGNP katkısından sonra sertlik ve kırılabilirliğin birlikte arttığını doğrulamaktadır.



Şekil 5.18. FGNP katkılı nanokompozitlerin sertliğinin, darbesinin ve gerilme mukavemetinin karşılaştırmalı değerlendirmesi.

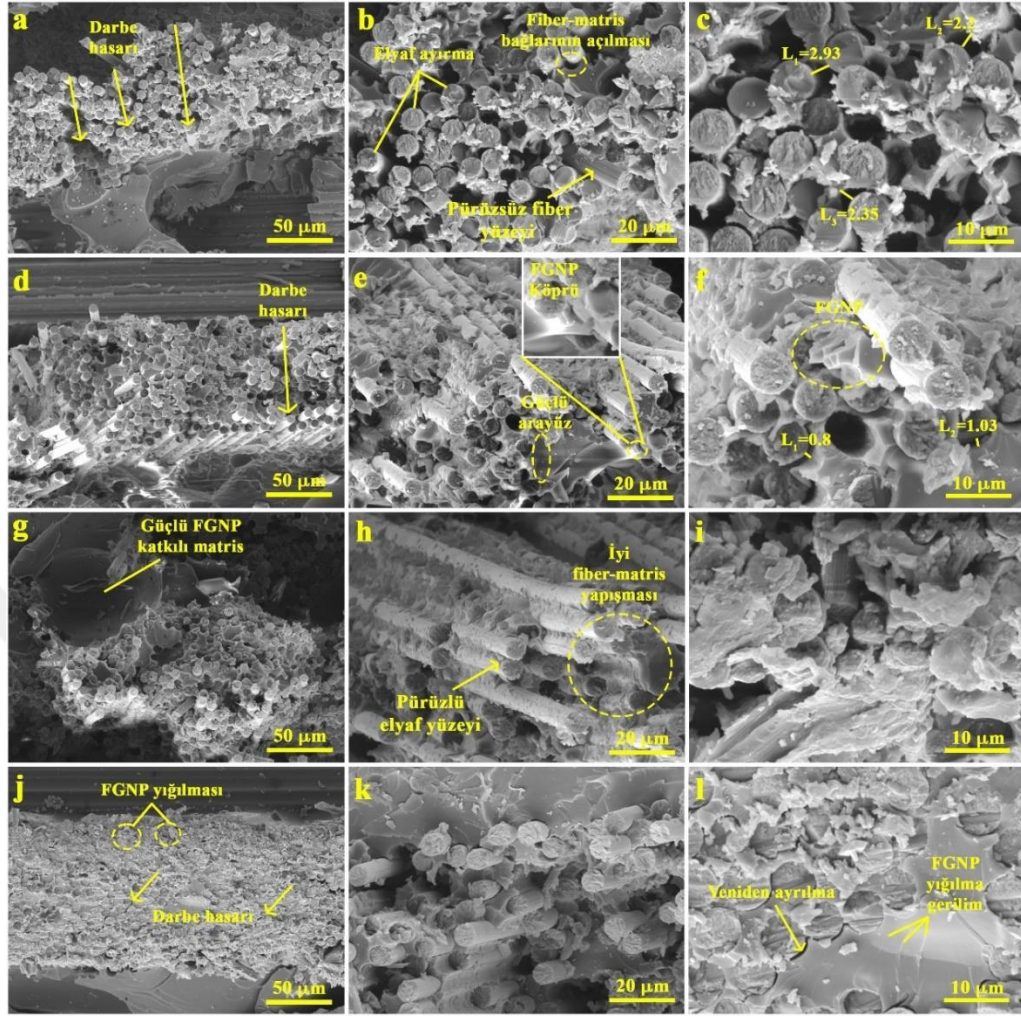
5.2.10. Kırılma Modu ve Morfoloji (SEM)

FGNP katkı maddesinin CFRP kompozitlerin mekanik özelliklerini arttırmadaki rolünü anlamak için katkısız CFRP kompozit ve 0,5 – 1 – 1,5 FGNP nanokompozitlerinin darbe testi sonrasında kırılma yüzeyleri SEM kullanılarak karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

Şekil 5.19 (a)'da katkısız kompozitte darbe kuvvetinin yeterince absorbe edilemediği ve kuvvetin yönüne bağlı olarak çatlakların oluştuğu görülmektedir. Şekil 5.19 (b)'de fiberler arasındaki yapışma ayrılması ve matris yapısındaki yapışma kırılması görülmektedir. Katkısız kompozitlerde ekstrüde edilmiş fiberlerin yüzeylerinin daha düzgün olduğu, Şekil 5.19 (c)'deki yüksek büyütmeli SEM görüntüsünde matris ile fiberler arasında oldukça büyük boşlukların olduğu, arayüzey yapışmasının nispeten zayıf olduğu ve darbe çatlağının büyümesine neden olduğu [2] görülmektedir.

Şekil 5.19 (f), fiberleri çevreleyen FGNP'lerin ince plaka istifli yapısını göstermektedir. Şekil 5.19 (e), katkılı nanokompozitlerde fiberlerin çevresinin daha pürüzlü olduğunu ve FGNP'nin fiber ile matris arasında köprüler oluşturduğunu göstermektedir. Bu durumda fiberlere daha fazla matrisin bağlandığı, FGNP katkısının nano ölçekteki boşlukları doldurduğu ve arayüzey yapışmasının daha güçlü olduğu gözlemlendi. Öte yandan 1 FGNP nanokompozitlerinde darbeli çatlak yayılımı daha yavaş ve çapraz bağlanan FGNP'ler çatlak büyümesini sınırladı [263]. Şekil 5.19 (g-h) darbe kuvvetini absorbe etmek için fiber ile matris arasında bir yapı oluşturduğunu göstermektedir. Ancak Şekil 5.19 (j)'de 1,5 FGNP nanokompozitlerinde matris ile fiber lifleri arasında boşluklar oluşmuş, ara yüzey dayanımında azalma olmuş ve darbe kuvveti çatlaklar oluşturmuştur. Ancak katkısız kompozitten çok daha iyiydi.

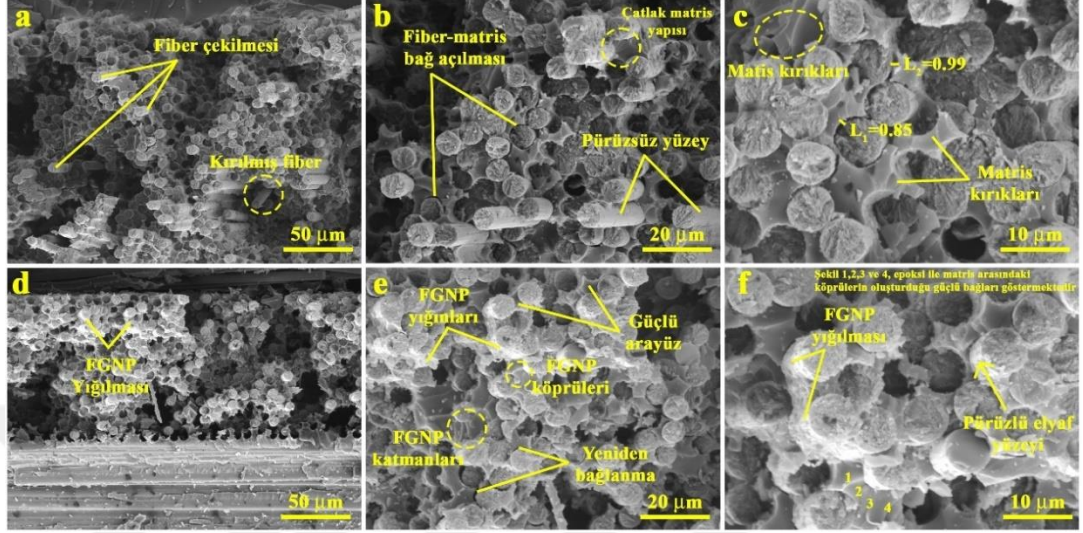
Bu durum FGNP'nin arayüzey yapışmasının azalmasına yol açan topaklanma oluşumuna atfedilebilir. Geniş bir spesifik yüzey alanına sahip olan GNP'ler Şekil 5.19 (j)'de gösterildiği gibi güçlü π - π düzlemler arası istifleme [273] nedeniyle birim alan başına yüksek yoğunlukta kullanıldığında toplanma eğilimindedir. Aglomerasyon nedeniyle matriste meydana gelen gerilimler Şekil 5.19 (l)'de gösterilmektedir. Aglomeralar mukavemette bir azalmaya neden olmuş ancak nanokompozitlerin sertliğini arttırmıştır [263]. Darbe testi kırılma yüzeylerindeki bu gözlemler Şekil 5.18'de verilen darbe dayanımı, çekme dayanımı ve sertlik testlerinin sonuçlarıyla uyumludur.



Şekil 5.19. Darbe kırılma yüzeyinin SEM görüntüleri: (a-c) katkısız kompozitler, (d-f) 0.5 FGNP nanokompozitler, (g-i) 1 FGNP nanokompozitler, (j-l) 1.5 FGNP nanokompozitler.

Aynı zamanda çekme testinde kırılan numunelerin kırık yüzeylerine SEM uygulandı. Katkısız kompozit ile ağırlıkça en yüksek katkı maddesi miktarına sahip 1,5 FGNP nanokompozitin SEM görüntüleri karşılaştırıldı. Şekil 5.20 (a-c)'da gösterilen katkısız kompozit örneğinde fiber yüzeylerinin pürüzsüz olduğu, matris arayüzünün fiberlerden ayrıldığı görülmektedir. Ayrıca çekme kuvvetine maruz kalan liflerin matris yapısından dışarı çekildiği matris yapısında kırılma ve çatlaklar görülmektedir. Şekil 5.20 (d-f)'da fiberlerin FGNP'ler ile kaplandığı ve matris yapısı ile köprüler oluşturduğu görülmektedir. FGNP miktarının artmasıyla birlikte güçlü π bağlarının katmanlar arası bağ birikimine ve topaklaşmaya neden olduğu görülmektedir. FGNP agregaları ve topaklanma, mekanik özelliklerde bir azalmaya neden olarak lifler ve

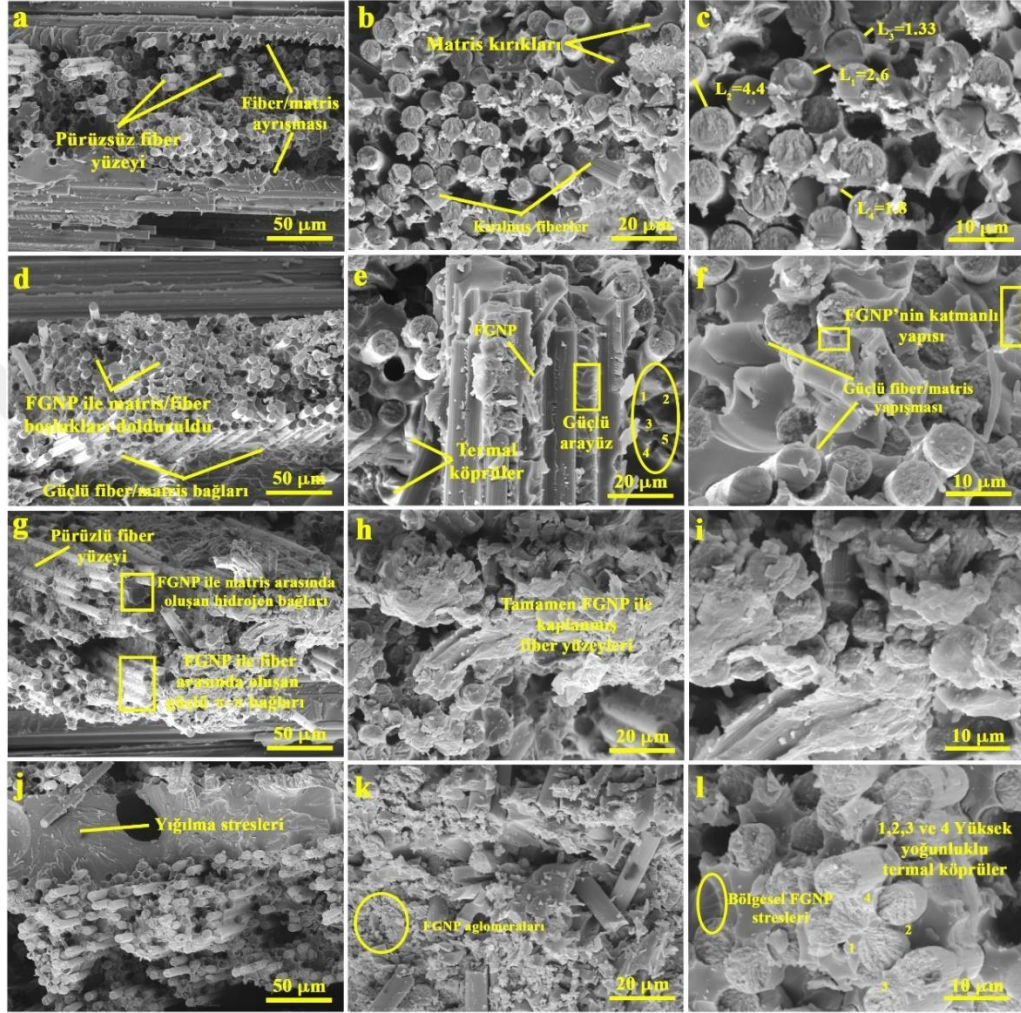
matris arasında yeniden ayrışmaya neden oldu. Karbon fiberler ile epoksi arasında iyi bir yapışma FGNP katkısı ile mümkündür [274].



Şekil 5.20. Çekme kırılma yüzeyinin SEM görüntüleri, (a-c) katkısız kompozitler, (d-f) 1,5 FGNP nanokompozitler.

Nanokompozitlerin termal ve elektriksel özelliklerinin iyileştirilmesinde FGNP katkısının rolünü anlamak için, nanokompozitlerin kırılma yüzeyi topografyası Şekil 5.21’da gösterildiği gibi SEM kullanılarak incelenmiştir. Şekil 5.21 (a-c)’da, karbon fiberler pürüzsüz bir yüzeye sahiptir; bariz matris kırıkları ve büyük boşluklar, kompozitin arayüzey yapışmasının nispeten zayıf olduğunu gösterir. Şekil 5.21 (d-f)’da, takviye elemanı karbon fiber ile epoksi matrisin arayüzey yapışmasını güçlendiren FGNP katkı maddelerini göstermektedir. FGNP katkısı aynı zamanda ısı ve elektriğin daha iyi iletilmesi için köprüler oluşturmuştur. Şekil 5.21 (g-i)’da liflerin tamamen FGNP ile kaplandığı ve yüzeylerin oldukça pürüzlü olduğu görülmektedir. FGNP katkısının elyaflarla güçlü π - π bağları, epoksi ile ise hidrojen bağları oluşturduğu görülmektedir. Bu bağlar nanokompozitlerin mekanik özelliklerini ve termal iletkenliğini geliştirse de oksidasyon, süzülme eşiğini artırarak elektriksel iletkenliği azaltabilir. Şekil 5.21 (j-l)’da, FGNP katkı maddelerinin yüksek yüzey alanlarından dolayı topaklanma eğilimi gösterdiği ve topaklanma gerilimi oluşturduğu görülmektedir. Ancak yine de fiber ve matris arayüzünde termal köprüler oluşturur. Nanokompozitlere ilişkin bu gözlemler, nanokompozitin termal ve elektriksel iletkenliği için elde edilen sonuçlarla tutarlıdır. Şekil 5.21’de görüldüğü gibi FGNP

nano katkısı matris ile fiber arasındaki arayüzü güçlendirerek aktarımı sağlayan köprüler oluşturur. Ek olarak bu görüntüler FGNP'lerin bağlanma yüzeylerine iyi bağlandığını göstermektedir.



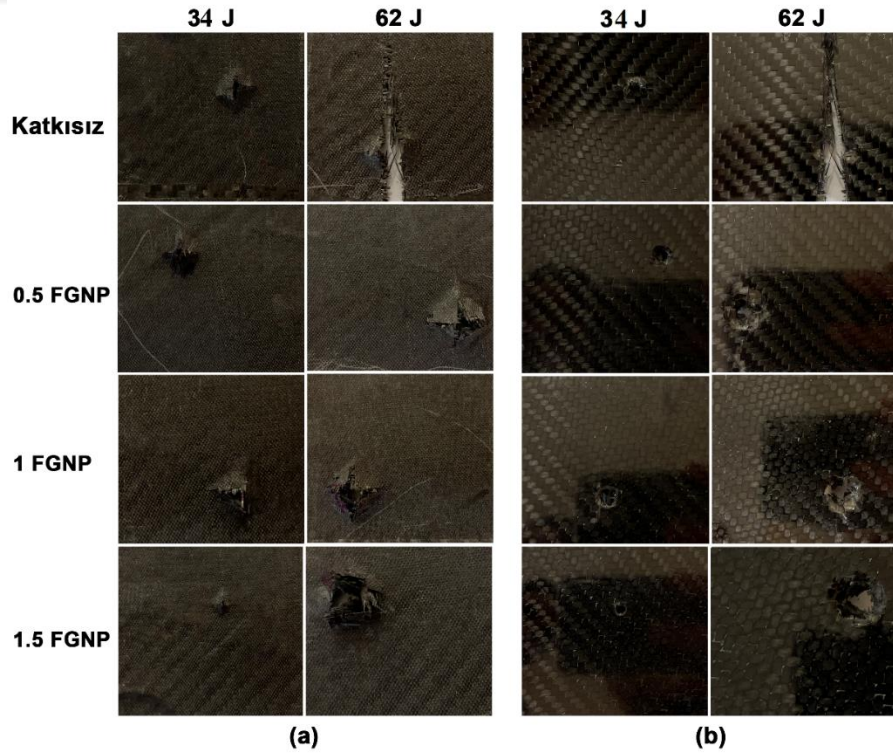
Şekil 5.21. Kırılma yüzeyinin SEM görüntüleri: (a-c) katkısız kompozitler, (d-f) 0,5 FGNP nanokompozitleri, (g-i) 1 FGNP nanokompozitleri, (j-l) 1,5 FGNP nanokompozitleri.

5.2.11. Ağırlık Düşürme Darbe Testi Sonuçları

Katkısız CFRP kompozit ile 0,5 – 1 – 1,5 FGNP katkılı nanokompozitlerin yüksek hızlı kamera altında oluşan hasarları ve çatlakları incelenmiştir. Şekil 5.22 (a) katkısız kompozit ve nanokompozitlerin ağırlık düşürme testi ile 34 J ve 62 J darbe kuvvetinden sonraki arka yüzey görüntülerini göstermektedir. Şekil 5.22 (b) ise

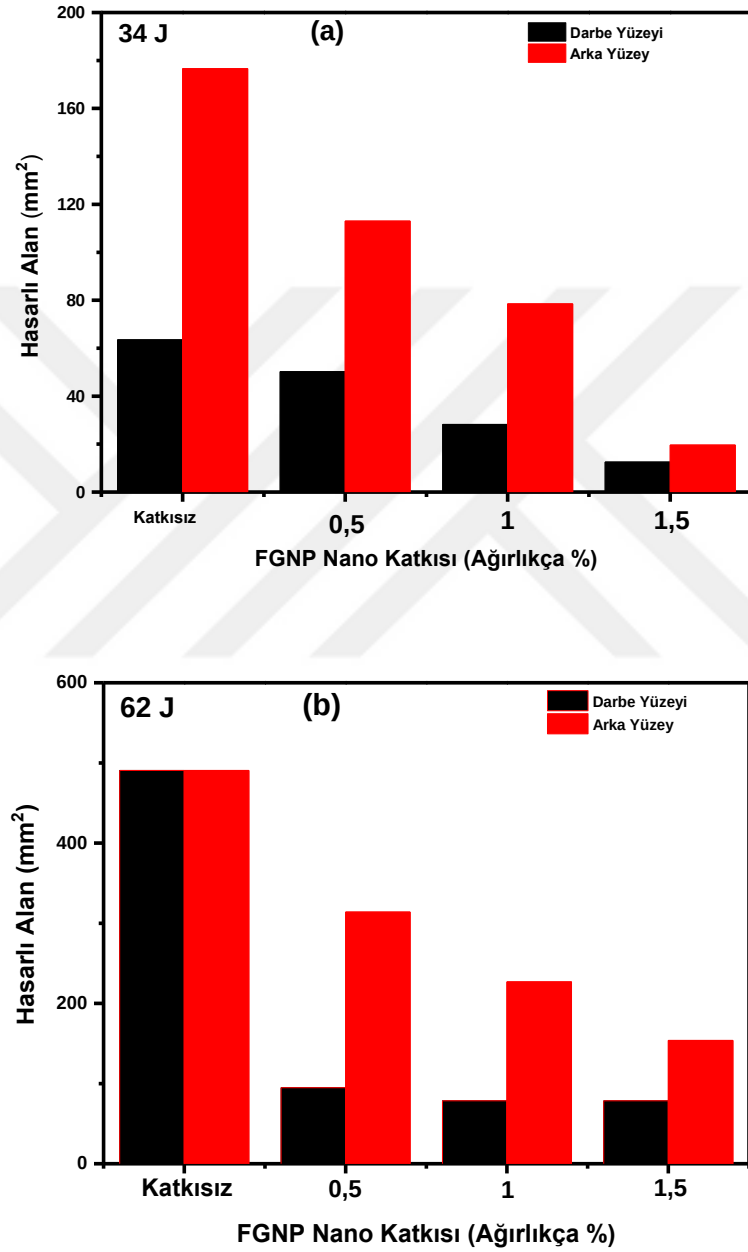
katkısız kompozit ve nanokompozitlerin ağırlık düşürme testi ile 34 J ve 62 J darbe kuvvetinden sonraki darbe yüzeyi görüntülerini göstermektedir.

Şekil 5.22 (a)'da ve (b)'de yüksek hızlı kamera ve kumpas ile yapılan hasarlı alan ve hasar derinliği bilgileri şöyledir. 34 J darbe ile olan hasarlara bakıldığında katkısız numunede 63,5 mm² büyüklüğünde ve 9 mm derinliğinde hasar oluşmuştur. 0,5 FGNP nanokompozitte 50,2 mm² ve 8 mm derinliğinde hasar oluşmuştur. 1 FGNP nanokompozitte 28,2 mm² büyüklüğünde ve 8 mm derinliğinde hasar oluşmuştur. 1,5 FGNP nanokompozitte ise 12,5 mm² büyüklüğünde ve 3 mm derinliğinde hasar oluşmuştur. 62 J darbe kuvveti sonucu oluşan hasarlara bakıldığında katkısız CFRP kompozitte tamamen kopma oluşmuştur, 490 mm² büyüklüğünde ve 30 mm derinliğinde hasar oluşmuştur, ancak FGNP katkılı numunelerde tamamen kopmanın olmadığı görülmektedir. 0,5 FGNP nanokompozitte 94,8 mm² büyüklüğünde ve 11 mm derinliğinde hasar oluşmuştur. 1 FGNP nanokompozitte 78,5 mm² büyüklüğünde ve 7 mm derinliğinde hasar oluşmuştur. 1,5 FGNP nanokompozitte ise 78,5 mm² büyüklüğünde ve 6 mm derinliğinde hasar oluşmuştur.

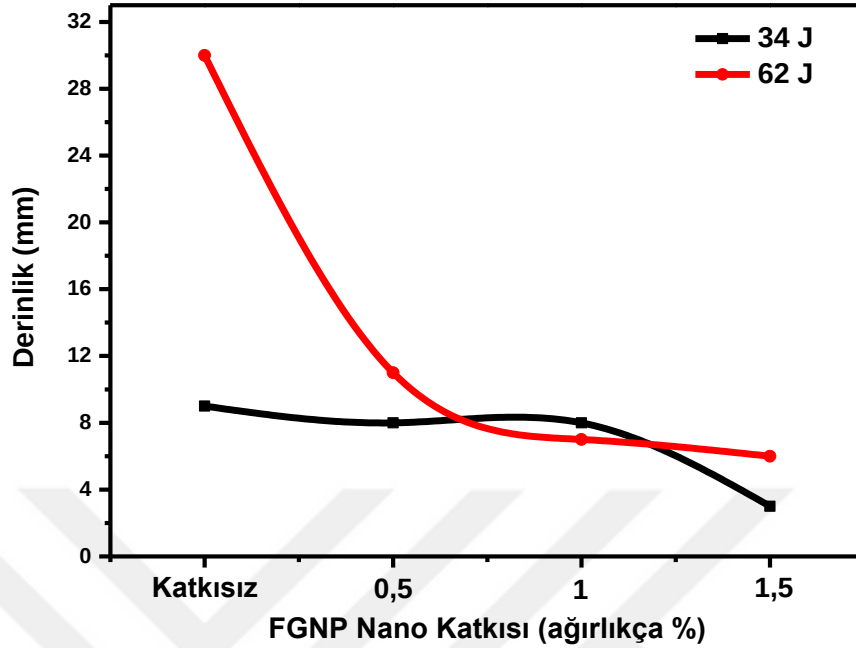


Şekil 5.22. FGNP katkılı nanokompozitlerin ağırlık düşürme darbe testi sonrası görüntüleri, (a) arka yüz ve (b) darbe yüzü.

Şekil 5.23 (a)'da 34 J ve Şekil 5.23 (b)'de 62 J'de test edilen numunelerin, darbenin geldiği yüzey siyah renk ile ve arka yüzey kırmızı renk ile darbenin oluşturduğu hasarlı alan grafikleri gösterilmektedir. Ayrıca Şekil 5.24'te FGNP nano katkısı ile hasarın derinliği ilişkisi verilmiştir.



Şekil 5.23. FGNP katkılı nanokompozitlerin ağırlık düşürme darbe testi sonuçları, 34 J ile oluşan hasarlı alan sonuçları (a) ve 62 J ile oluşan hasarlı alan sonuçları (b).



Şekil 5.24. FGNP katkılı nanokompozitlerde ağırlık düşürme darbe testi sonrası nano katkı- derinlik ilişkisi.

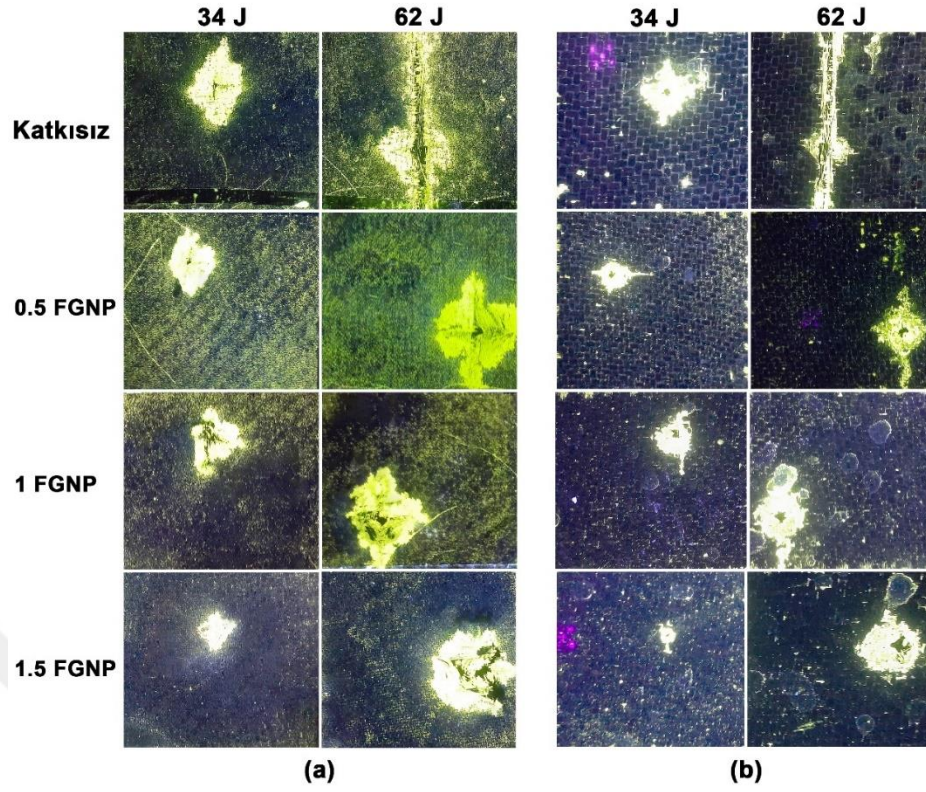
CFRP kompozitler yapıları gereği kırılmandır ve maksimum kuvvete ulaşıncaya kadar elastik tepki verirler. Darbe enerjisi maksimum kuvvete kadar emilen enerjiden daha yüksekse, fazla olan enerji miktarı kompozit ile çarpma tertibatı arasındaki sürtünmede kaybedilen az miktardaki enerji ile hasar oluşumunda kaybedilen enerji miktarının toplamı kadardır. Darbe enerjisi arttıkça CFRP yapı büyük deformasyona uğrar. Darbenin oluşundan sonra darbe kuvvetleri nanokompoziti ön yüzeyden arka yüzeye doğru 90 ° kadar bükme isteğinden dolayı kompozitlerde çekme uzamasına benzeyen hasarlı bir derinlik oluşturur [275].

GNP'lerin fonksiyonlaştırılması ile yüzeyde oluşan fonksiyonel gruplar [276] matris fazı ile takviye fazının daha iyi birleşmesini sağladı. Katkısız CFRP kompozitte 34 J ve 62 J kuvvetlerinin her ikisinde de hasar çok daha fazla olmuştur. Ağırlık düşürme darbe testinde FGNP ilavesi ile hasarın azaldığı görülmektedir. Ancak arka yüzeyler incelendiğinde 1,5 FGNP nanokompozitlerinde fiber kırılmasının daha belirgin olduğu ve nanokompozit yapısal bütünlüğünün daha fazla bozulduğu görülmektedir. Bu durum FGNP'lerin yeniden yığılma ve topaklanmasına bağlı olarak darbe emici

özelliklerini kaybettiği ve homojen dağılmayan FGNPlerin kuvvet aktarımını tam sağlayamadığına atfedilmiştir.

5.2.12. FPI Yöntemi ile Hasar Kontrolü

Ağırlık düşürme darbe testi sonrası katkısız CFRP kompozit ile 0,5 – 1 – 1,5 FGNP nanokompozitlerin floresan penetrant muayenesi (FPI) altında oluşan hasarlar ve çatlaklar incelenmiştir. Şekil 5.25'te sırasıyla 34 J ve 62 J'de test edilen numunelerin arka yüzeyleri (a) ve darbe yüzeyleri (b) FPI görüntüleri gösterilmektedir. Şekil 5.25 (b)'deki görüntüler, koparak kırım geçirmeyen dolayısıyla bütünlüğü tamamen bozulmamış kompozit ve nanokompozitlerin, delaminasyon ve fiber kırılmasından kaynaklanabilecek belirgin yüzey hasarını göstermektedir. Darbe enerjisinin artmasıyla oluşan hasar arttı. Numunelerde görülen çapraz desen elyaftaki atkı ve çözgü ipliklerinin 0°/90° kesişmelerinden kaynaklanmaktadır. Şekil 5.25 (a)'da nanokompozitlerin darbe nedeniyle delinmesinden kaynaklanan bombeli bir desen görülmektedir. FGNP katkısının hem hasar çapını hem de hasar yolu çatlaklarının azalttığı görülmektedir. FGNP arafazının arayüzeyde daha iyi fiber-matris yapışmasını sağlaması, fiber-matris arasındaki boşlukları doldurarak gelen kuvveti paylaşması ve kesintisiz aktarmasından kaynaklanmaktadır [264].



Şekil 5.25. FGNP Katkılı nanokompozitlerde FPI yöntemi ile hasar ve çatlak kontrolü, (a) arka yüz ve (b) darbe yüzü.

Şekil 5.25 (a)'da gösterilen panellerin arka tarafı artan FGNP konsantrasyonuyla birlikte azalan bir yüzey hasar alanına sahiptir ve nüfuz eden floresan azalır, dolayısıyla yüzey hasar yoğunluğu azalır.

Darbe şiddeti seviyesi 34 J'den 62 J'e çıkarıldığında oluşan hasar çok daha yüksektir; bu da darbe enerjisinin yüksek olmasıyla çatlak ilerlemesindeki artışında fazla olacağı dolayısıyla kompozitin o kadar fazla hasara uğradığını kanıtlamaktadır. FGNP ilavesi ile hasar çaplarının azalması hatta hasar yerine çatlakların oluşması ve ağırlıkça FGNP miktarının artmasıyla ağırlıkça daha düşük miktarlarda katkılı nano kompozitlere göre hem hasar çapının hem de çatlak boyunun kısılması FGNP'lerin darbe kuvvetini emme kapasitesinin ve sağlamlığının artırılmasında rol oynadığına dair kanıt sağlamaktadır. Darbe mukavemetinin artması aynı zamanda darbe enerjisi emilimini artıran, çatlak sapmasını ve çatlak sabitlemeyi mümkün kılarak bir sağlamlaştırma mekanizması sağlayan FGNP'nin rolünden kaynaklanmaktadır [264][277].

5.2.13. Termografik Muayene ile Yapay Hata Kontrolü

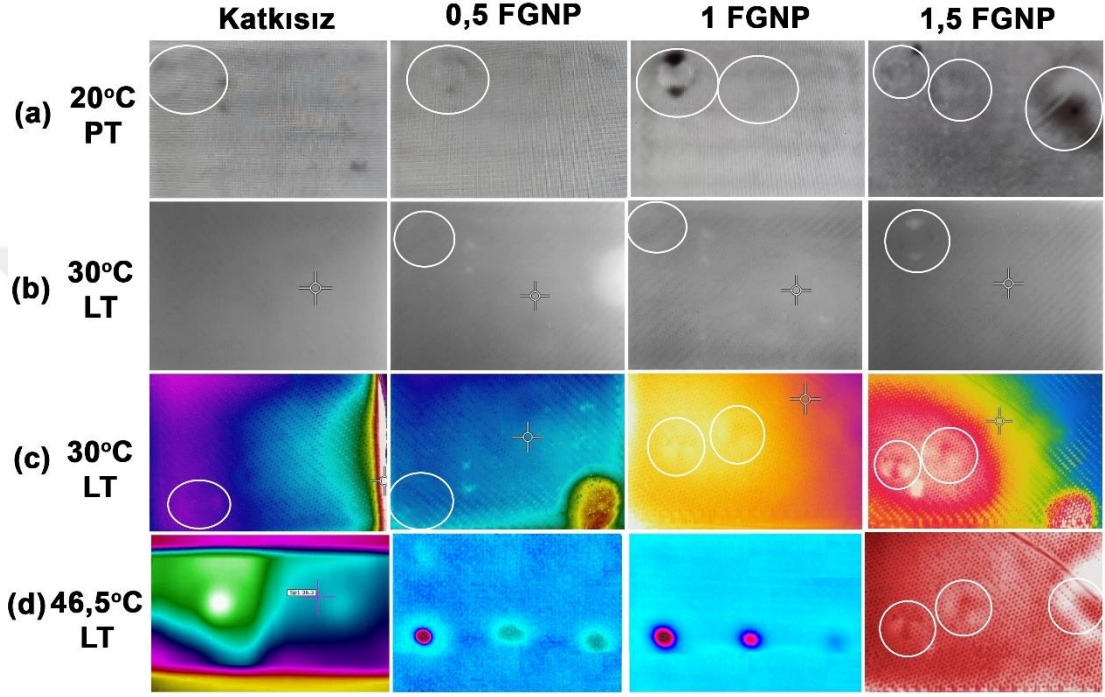
Katkısız CFRP kompozit plaka ve FGNP katkılı CFRP nanokompozitler farklı sıcaklıklarda termografi yöntemi ile muayene edilmiştir. Ortam sıcaklığında (20 °C) yapılan kontrollerde LT ile hata tespiti yapılamadı, bu yöntemle yapay hatalar ile sağlam bölgeler arasındaki ısı farkının daha yüksek olması gerekmektedir. Bir ısıtıcı veya soğutucu kullanarak aradaki ısı farkı artırılmalıdır.

Ancak PT yöntemi daha hassas muayene olduğu için ortam sıcaklığında (20 °C) yapay hataların tespiti yapılabilmektedir. Katkısız kompozit ve FGNP katkılı CFRP nanokompozitlerin hepsinde 5 kat (~ 1,6mm) derinlikteki yapay hatalar tespit edilebildi. Şekil 5.26 (a) satırında sağa gidildikçe görüldüğü gibi FGNP konsantrasyonu arttıkça yapay hataların daha belirgin olduğu görülmüştür. 1 FGNP nanokompozitte 5 kat (~ 1,6mm) derinlikteki yapay hata ile 10 kat (~ 3,2mm) derinlikteki yapay hata görülebilmektedir. Hatta 1,5 FGNP nanokompozit plakasında 20 kat (~ 6,4 mm) derinlikteki yapay hata dahi tespit edilmiştir.

30 °C LT ile yapılan termografik muayenede katkısız kompozitte hata tespiti yapılamazken Şekil 5.26 (b) satırında sağa gidildikçe FGNP katkı miktarının artmasıyla 5 kat (~ 1,6mm) derinlikteki yapay daha belirginleştiği görülmektedir. FGNP katkısının termal iletkenliği arttırdığı açıkça görülmektedir. Aynı görüntüler termal kamerada renkli moda geçildiğinde Şekil 5.26 (c) satırında verildiği gibi 1 FGNP ve 1,5 FGNP nanokompozitlerinde 10 kat (~ 3,2mm) derinlikteki yapay hatalarda görülebilmektedir. Yapay hataların tespitindeki bu durum FGNP nano katkısının epoksi ile fiber arayüzeyindeki boşluklarda termal köprüler kurarak termal iletkenliği arttırdığına, ısı akışını kolaylaştıracak yollar oluşturduğuna atfedilmiştir.

46.5 °C' de yapılan LT kontrollerinde ise Şekil 5.26 (d) satırında görüldüğü üzere katkısız kompozitte 5 kat (~ 1,6mm) derinlikteki yapay hatalar çok açık ve 10 kat (~ 3,2mm) derinlikteki yapay hatalar ise belirgin olmamakla beraber tespit edilebildi. FGNP katkılı nanokompozitlerin tamamında 5 kat (~ 1,6mm) derinlikteki yapay hatalar çok net tespit edilebildi. 0,5 FGNP nanokompozitte 10 kat (~ 3,2mm) ve 15 kat (~ 4,8mm) derinlikteki hatalar kolay algılanacak görünürlükteydi. 1 FGNP

nanokompozitte 10 kat (~ 3,2mm) derinlikteki yapay hatalar çok net ve 15 kat (~ 4,8 mm) derinlikteki yapay hatalar kolay algılanacak görünürlükteydi. 1,5 FGNP 5 kat (~ 1,6mm) derinlikteki yapay hata ile 10 kat (~ 3,2mm) derinlikteki yapay hata görülebilmektedir, hatta 20 kat (~ 6,4mm) derinlikteki yapay hata dahi tespit edilebilmektedir.



Şekil 5.26. Yapay hata bulunduran FGNP katkılı nanokompozitlerin termografi muayenesi.

Katkısız kompozitte ısının alt kısımdaki fiberlere ulaşmamasından daha derindeki hatalar tespit edilmemiştir. Ancak FGNP katkısının Şekil 5.9 (a)'da verildiği gibi Tg'yi arttırdığı DSC sonuçlarından görülmüştür. FGNP katkısının ısı transferini hızlandırdığını fiber tabakaları arası hızlı yayılan ısının yapay hatalara ulaştığında ısı farklarının oluşması ve hataların tespitini kolaylaştırdığı görülmektedir. Yapay hataların olduğu bölgeler ısıyı soğuracağından kusursuz bölgelere göre daha düşük ısı olur. FGNP arafazı epoksi fazı ile fiber takviye fazı arasında termal köprüler oluşturmaktadır. Şekil 5.21 (e)'deki SEM görüntülerinde FGNP nano katkısının oluşturduğu termal köprüler açıkça görülmektedir. Aynı zamanda Şekil 5.8'de verilen ve FT-IR sonuçlarına göre sürfaktan GNP'lerin yüzeyini fonksiyonlaştırırken yüzeyde fonksiyonel gruplar oluşturmuşlardır. Fonksiyonel gruplar epoksi matrisi ile hidrojen

bağları, fiber takviyesi ile güçlü π - π bağları kurarak ısıнын transferine yardımcı olmuşlardır.

Şekil 5.9 (b)'de açıklandığı üzere FGNP nano katkısı nanokompzolitlerin entalpisini arttırmıştı, yapay hataların olduğu FGNP nano katkısının daha az bulunması bu bölgelerde entalpiyi azaltıp entropiyi arttırmıştır [278] oluşan entropi farkından dolayı daha derindeki hataların tespiti kolaylaşmıştır.

FGNP katkı miktarı arttıkça nanokompzozitin yoğunluğu artar. Şekil 5.26'daki termogramlardan da görüldüğü üzere katkı oranlarındaki artış nanokompzozitlerde termal iletkenliği ve termal yayılmayı arttırmıştır dolayısıyla 1,5 FGNP nanokompzozitte her iki sıcaklık durumunda da daha derindeki hatalar tespit edilmiştir. Bununla birlikte katkı miktarının artmasıyla nanokompzozit malzemenin ısı kapasitesi artmayabilir [279] hatta katkı miktarının sağladığı ısı enerjisi ısı eşik değeri geçmesi durumunda ısı kapasitesinde düşüş olur [280].

CFRP kompozitlerinde arayüzey termal direnci grafen bazlı polimer matrisli nanokompzozitlerin termal iletkenliğinin daha da geliştirilmesinde temel engellerden biridir. Ancak GNP'nin oluşturduğu termal köprülerde ısı akışını kolaylaştıran anyonik surfaktan (SDS) ve kovalent olmayan işlevselleştirme tekniği ile termal köprülerin etrafında oluşturduğu minimum oksidasyon üstün termal iletkenlik elde etmek için arayüzey termal direncini azaltmada umut verici olduğunu göstermiştir.

Geliştirilen hipotezin doğrulandığı, yapay hataları ve yapay hata dağılımlarını termografi yöntemiyle tahribatsız bir şekilde tespit edebildiği ayrıca fabrikasyon veya uçuş esnasında oluşabilecek kaynaklı kusurların varlığında nanokompzozitlerin termal tepkisinden dolayı termografi yöntemiyle muayene edilebilmesi mümkündür.

BÖLÜM 6

SONUÇLAR

Bu çalışmada ağırlıkça % 0,5 – 1 – 1,5 oranlarındaki FGNP katkılı CFRP nanokompozit malzemeler ve ağırlıkça % 0,5 – 1 – 1,5 oranlarındaki FMWCNT katkılı CFRP nanokompozit malzemeler üretilerek kimyasal, elektriksel, termal ve mekanik özellikleri belirlenerek yapısal olarak karakterize edilmiştir. FMWCNT nano katkısının elektriksel özellikleri yeterince iyileştirmemesinden dolayı FMWCNT katkılı CFRP nanokompozit malzemelere mekanik testler ve karakterizasyon yapılmamıştır. FGNP'nin açıklanan özelliklerinin ana fikrinin, polimer matrisinin çapraz bağlanma ve reolojik özelliklerini iyileştirebilen, böylece kendiliğinden mekanik kuvvetler, elektrik ve termal akım aktarımını kolaylaştırabilen ve epoksi molekülleri ile optimal etkileşimi teşvik etme yeteneği olduğu ayrıntılı olarak incelenmiştir.

1. SDS sürfaktanı grafen nanoplateletlerin (GNP) ve Triton X-100 sürfaktanı ise çok cidarlı karbon nanotüplerin (MWCNT) fonksiyonlaştırılması için etkilidir, ancak sürfaktan miktarını Kritik Misel Konsantrasyonuna (CMC) göre belirlemek gereklidir.
2. % 0,5 MWCNT'nin absorbans değeri 325 nm'deki diğer konsantrasyonlardan daha yüksektir. Diğer konsantrasyonlarda agolmerasyonun oluşma eğiliminin başlamasına atfedilmiştir.
3. FGNP katkı maddelerinin önemli ölçüde homojenize olduğu tespit edildi. UV-Vis emiliminde grafiğin 285 nm ve 298 nm tepe noktaları sırasıyla π - π ve n - π olukları olarak kabul edilir. % 1,5 FGNP katkısının oldukça başarılı olduğu ancak % 1 FGNP katkısının da oldukça anlamlı olduğu görülüyor. % 1 FGNP ile % 1,5 FGNP absorbans değerindeki önemsiz artış, ağırlıkça % 1,5' tan fazla

katkılamanın yeniden yığılmaya ve aglomeralara neden olabileceği öngörüsünü oluşturdu.

4. FT-IR sonuçları, epoksi ve COOH ile fonksiyonlaştırılmış MWCNT'ler arasındaki reaksiyonun yeni bir epoksi-MWCNT nanokompoziti ürettiğini kanıtladı.
5. FT-IR sonuçları, ester bağının, epoksit grupları ve epoksi molekülleri tarafından grafen nanoplatelet üzerine başarılı bir şekilde kovalent olarak aşılandığını doğruladı. Ayrıca SDS'deki oksijen bazlı fonksiyonel grupların konjugasyonu bozması nedeniyle C=C bağ yoğunluğu daha düşüktü.
6. Katkısız kompozit ve 0,5 – 1 – 1,5 FMWCNT katkılı epoksi nanokompozitlerin Tg'si sırasıyla 44,51 °C, 70 °C, 61,30 °C ve 66,33 °C olarak ölçülmüştür. Epoksiye ağırlıkça % 0,5 oranında FMWCNT eklenmesi, Tg'yi 70°C'ye arttırmıştır. Bu durum COOH gruplarının izotermal olmayan ısıtma üzerine epoksi gruplarıyla reaksiyona girerek ester bağlantısına neden olduğunu göstermiştir.
7. Katkısız kompozit ve 0,5 – 1 – 1,5 FGNP katkılı epoksi nanokompozitlerin Tg'si sırasıyla 121 °C, 123 °C, 127 °C ve 133 °C olarak ölçülmüştür. Katkısız kompozitle karşılaştırıldığında yaklaşık %10'luk bir iyileşme vardı. FGNP, matris ile fiber arayüzü arasındaki boşlukları doldurarak ısı akışını sağlamak için termal köprüler oluşturdu. Öte yandan eklenen FGNP, sertleşmeyi, özellikle de 2-amin reaksiyonunu hızlandırmıştır, bu da daha yüksek bir çapraz bağlantı yoğunluğu ağı ve dolayısıyla daha yüksek bir Tg ile sonuçlanmıştır.
8. Katkısız kompozit ve 0,5 – 1 – 1,5 FGNP nanokompozitlerinin erime sıcaklıkları sırasıyla 366 °C, 368 °C, 370 °C ve 370,3 °C'dir. Erime entalpileri sırasıyla 32,28 J/g, 49,75 J/g, 58,23 J/g ve 61,32 J/g'dir. Yüksek yüzey alanına sahip yüzey işlevselleştirilmiş FGNP'ler çapraz bağlanma reaksiyonlarını arttırmıştır. Aynı zamanda işlevselleştirilmiş yüzey, karbon fiberlerle güçlü π - π bağları ve epoksi ile güçlü hidrojen bağları kurarak ayrışmayı geciktirmiştir.

9. FMWCNT katkılı nanokompozitler arasında 1,5 FMWCNT takviyeli malzeme tüm sıcaklıklarda en iyi iletkendi. Aynı zamanda artan sıcaklıkla birlikte iletkenlik de arttı. 10.000 Hz frekansta, % 1,5 MWCNT katkılı nanokompozit, 120 °C’de yaklaşık 6×10^{-7} S.cm⁻¹ iletkenlik göstermesine rağmen, 20 °C’de yaklaşık 2×10^{-7} S.cm⁻¹ iletkenlik göstermiştir.
10. Kitle akım yoğunluğunda; 0,5 FGNP nanokompozitte iletkenlik 0,03 V’da 0,12 A.cm⁻³’ten 0,18 A.cm⁻³’e yükseldi ve katkısız kompozitle karşılaştırıldığında % 50 arttı. Yüzey akım yoğunluğu ile ilgili olarak, 1 FGNP nanokompozitte iletkenlik 0,03 V’da 0,024 A.cm⁻²’den 0,028 A.cm⁻²’ye yükseldi ve katkısız kompozitle karşılaştırıldığında % 18 arttı. Enerji bariyerindeki katkı maddesindeki oksijen grupları arttığından voltaj eşik değeri artmıştır. 1,5 FGNP nanokompozitte ise yüksek katkı oranlarında nanokompozite daha fazla oksijen grubu eklenmesi voltaj eşik değeri artmasına ve grafen nanoplatelet sp² ağ yapısının bozulmasına neden olduğundan iletkenlik azalmıştır.
11. Katkısız kompozit ve FGNP katkılı nanokompozitlerde yaklaşık 215 °C’ ye kadar olan küçük ağırlık değişiklikleri (% 4), kürlleme işlemi sırasında giderilemeyen ortam neminden kaynaklanmıştır. 215 °C’ den sonraki aşamada %30’luk bir kütle kaybı yaşandı. 350 °C ile 400 °C arasındaki hızlı kütle kayıpları, epoksinin erime noktasına ulaşan termal oksidasyonundan kaynaklanmaktadır. 440 °C ile 505 °C arasındaki kütle kayıpları, daha kararlı oksijen içeren fonksiyonel grupların yol olmasından kaynaklanmaktadır. Nanokompozit içerisindeki FGNP nano katkı maddesi miktarı arttıkça oksijen fonksiyonel grupları da artmaktadır. Bu nedenle FGNP nano katkısının miktarı arttıkça daha düşük sıcaklıklarda bozunma başlamıştır. 500 °C’den sonraki aşamada meydana gelen % 25’lik kütle kaybı, özellikle 545 °C ile 560 °C arasında grafen nanoplatelet yapısındaki kararsız karbon gruplarının ayrışmasından kaynaklanmaktadır.
12. TGA analizlerine göre katkısız kompozit ve 0,5 – 1 – 1,5 FGNP nanokompozitlerinin bozunmaya başlama sıcaklığı (T_i) ve maksimum bozunma sıcaklığı (T_m) sırasıyla 311,79 °C, 360,20 °C; 317,82 °C, 366,30 °C;

330,50 °C, 370,09 °C ve 339,45 °C, 370,96 olarak ölçülmüştür. Katkısız kompozitlerin maksimum bozunma sıcaklığı (T_m) FGNP katkısıyla bir miktar iyileştirilmiştir. FGNP katkısı ağırlıkça % 1,5 olduğunda T_m değeri katkısız kompozitten 10,76 °C daha yüksek ölçülmüştür. FGNP katkısının malzemenin bozunma sıcaklığını arttırdığı görülmüştür.

13. SEM görüntüleri DSC analiz sonuçlarını ve elektrik iletkenlik test sonuçlarını doğrulamıştır. GNP'lerin açık literatürde de açıklandığı gibi epoksi matrisi ile hidrojen bağları ve fiber takviyesi ile güçlü π - π bağları oluşturduğu dolayısıyla ısı ve elektrik akışını kolaylaştıracak yollar oluşturduğu teyit edilmiştir.
14. Katkısız kompozitlerde 264,5 MPa gerilme altında kopma ve 1,61 mm/mm uzama olduğu; 0,5 FGNP nanokompozitte 391,6 MPa gerilim altında kopma ve 1.895 mm/mm uzama olduğu; 1 FGNP nanokompozitte 502,5 MPa gerilim altında kopma ve 2,341 mm/mm uzama olduğu; 1,5 FGNP nanokompozitte ise 490 MPa gerilim altında kopma ve 2,257 mm/mm uzama olduğu gözlemlendi. Çekme mukavemeti ve gerilim dengeleme veriminin FGNP konsantrasyonu ile önemli ölçüde arttığı bulunmuştur. Çekme mukavemeti 1 FGNP nanokompozitinde % 92 iyileşme ile maksimum seviyeye ulaştı. 1,5 FGNP nanokompozitinde, çekme özelliklerinin hafifçe azalmasına yol açar. FGNP kümelenmeleri: FGNP'ler birbirlerine yaklaştıklarında aralarında oluşabilecek van der Waals (π - π) çekim kuvvetleri nedeniyle aglomeralar oluşturduğuna atfedilmiştir. Bu topaklar kolaylıkla karbon fiber ve epoksi matris arasında daha zayıf arayüzey etkileşimine neden olmuştur.
15. Katkısız kompozitte darbe dayanımı 2,53 J/mm² olarak ölçülmüştür. 0,5 – 1 – 1,5 FGNP nanokompozitlerinin darbe dayanımı sırasıyla 2,76 J/mm², 3,23 J/mm² ve 2,83 J/mm² olarak ölçüldü. En iyi sonucun ağırlıkça 1 FGNP nanokompozitte % 28'lik bir iyileşme olduğu gözlenirken 1,5 FGNP nanokompozitte iyileşmenin artmadığı gözlemlendi. Güçlü bir şekilde bağlanmış ancak katı bir arafaz, sıklıkla arayüzde yüksek gerilim aktarımına yol açabilir. Güçlü arayüz, stresi doğrudan matristen karbon fibere aktarabilir ve bu durum kırılgan bir yapıya neden olmuştur. Ayrıca ağırlıkça % 1,5 FGNP katkılamının

aglomeralar oluşturduğu FGNP'lerin iletimi sağlayan köprü fonksiyonun bozulduğu düşünülmüştür.

16. Çekme testi ile darbe testi sonuçları UV-Vis absorpsiyon analiz sonuçları ile uyumludur. UV-Vis absorpsiyon analiz sonuçlarına göre 1 FGNP'den 1,5 FGNP'ye küçük sıçrama artık FGNP'lerde aglomera eğiliminin ve yığılmaların başladığını göstermektedir.
17. SEM görüntülerine göre katkısız kompozitlerde CF'lerin pürüzsüz bir yüzeye sahip olması, kompozit için arayüzey yapışmasının nispeten zayıf olduğunu göstermiştir. FGNP katkılı nanokompozitler için, ekstrüde edilmiş CF'ler ile epoksi matris arasındaki boşluklar çok daha küçük hale geldi. CF epoksi arayüz yapışması en ideal 1 FGNP nanokompozitte olmuştur. Ayrıca 0,5 FGNP nanokompozit için de oldukça anlamlıdır. 1,5 FGNP nanokompozittein arayüz yapışma mukavemetini azalttığını, ancak yine de katkısız numunelerden çok daha iyi olduğunu göstermiştir. Bu muhtemelen CF yüzeyleri üzerinde 1,5 FGNP katkılı numunede meydana gelen ve arayüzey yapışmasını azaltan FGNP topaklaşmasına atfedilmiştir.
18. SEM görüntüleri, UV-Vis absorpsiyon analiz sonuçları ile uyumludur. FGNP konsantrasyonun ağırlıkça % 1 den % 1,5'a artırılması ile FGNP'lerin aglomera eğiliminde olduğu görülmüştür.
19. SEM görüntüleri çekme testi ve darbe testi sonuçları ile uyumludur. FGNP ilavesi ile çekme ve darbe mukavemetinin arttığı görülmüştür. Çekme testi ve darbe testi sonrası ayrı ayrı yapılan SEM çekimlerinde katkısız kompozitte fiber ile matris arasındaki boşluklar 2-3 μm iken 0,5 FGNP nanokompozitte 0,8 μm ve 1 FGNP nanokompozittte boşluk oluşmadığı tespit edilmiştir. Fiber matris arayüzeyindeki boşlukları doldurarak kuvvet aktarımını sağlayan köprüler ve güçlü arayüz oluşturduğu SEM görüntüleri doğrulanmıştır. 1,5 FGNP nanokompozittte aglomera eğiliminin başladığını, yeniden yığılmaların oluştuğu ve yığılma gerilmeleri sonucu fiber matris arayüzeyinde boşluk oluştuğu görülmüştür.

20. Katkısız kompozittin sertliği 20 HV3 ve 84 Shore D değerlerinde ölçülmüştür. 0,5 – 1 – 1,5 FGNP nanokompozitlerinin sertlikleri sırasıyla 22 HV3 ve 86 Shore D; 31 HV3 ve 91 Shore D; 40 HV3 ve 96 Shore D olarak ölçülmüştür. Yüzey fonksiyonlaştırma işlemi ile daha fazla miktarda FGNP homojen katkılanmış ve katkı arttıkça sertlik de artmıştır. SEM görüntülerinden de görüldüğü üzere FGNP ile epoksi matris arasındaki hidrojen bağları ve yoğun FGNP çapraz bağları nedeniyle güçlü arayüz bağları oluşmuştur. Maksimum sertlik değeri % 100 (40 HV3) ve % 14 (96 Shore D) artışla 1,5 FGNP nanokompozitte olduğu belirlendi.
21. FGNP'lerin ağırlıkça % miktarı arttıkça, dolgu parçacıkları fiber takviyesi ile epoksi matris arasındaki boşlukları doldurarak daha kalın bir malzeme oluşturdu ve nanokompozitlerin sertliği arttı. Sertliğin artması kırılabilirliği de arttırdı. Kırılabilirliği artırılmış 1,5 FGNP nanokompoziti, 1 FGNP nanokompozitinden daha küçük çekme ve darbe kuvvetlerinde hasar görmüştür. Dolayısıyla 1,5 FGNP nanokompozitin çekme ve darbe dayanımı 1 FGNP nanokompozite göre azalırken, sertlik değeri arttı.
22. Ağırlık düşürme darbe testi sonuçlarına göre FGNP miktarının artması ile hasarlı alan ve hasar derinliği azalmıştır. 34 J darbe testi sonuçlarına göre katkısız kompozitte 63,5 mm² hasarlı alan ve 9 mm derinliğinde hasar derinliği oluşmuştur. Bununla birlikte 0,5 FGNP – 1 FGNP – 1,5 FGNP nanokompozitlerinin hasarlı alan ve hasar derinlikleri sırasıyla 50,2 mm² ve 8 mm; 28,2 mm² ve 8 mm; 12,5 mm² ve 3 mm olarak ölçülmüştür. 62 J darbe testi sonuçlarına göre katkısız kompozitte 490 mm² hasarlı alan ve 30 mm derinliğinde hasar derinliği oluşmuştur. Bununla birlikte 0,5 FGNP – 1 FGNP – 1,5 FGNP nanokompozitlerinin hasarlı alan ve hasar derinlikleri sırasıyla 94,8 mm² ve 11 mm; 78,5 mm² ve 7 mm; 78,5 mm² ve 6 mm olarak ölçülmüştür. GNP'lerin fonksiyonlaştırılması ile yüzeyde oluşan fonksiyonel gruplar matris fazı ile takviye fazının daha iyi yapışmasını sağladı. Katkısız CFRP kompozitte 34 J ve 62 J kuvvetlerinin her ikisinde de hasar çok daha fazla olmuştur. Her ne kadar FGNP katkısı arttıkça hasarlı alan ve hasar derinliği azalmış olsa da darbe testinden sonra nanokompozitlerin arka

yüzeyler incelendiğinde 1,5 FGNP nanokompozitlerinde fiber kırılmasının daha belirgin olduğu, nanokompozit yapısal bütünlüğünün daha fazla bozulduğu görülmektedir. Bu durum FGNP'lerin yeniden yığılma ve topaklanmasına bağlı olarak darbe emici özelliklerini kaybettiği ve homojen dağılmayan FGNP'lerin kuvvet aktarımını tam sağlayamadığına atfedilmiştir.

23. Ağırlık düşürme ile darbe testinden sonra katkısız kompozit ve nanokompozitlere FPI yöntemi ile hasar muayenesi yapıldı. FGNP katkısının hem hasar çapını hem de hasar yolu çatlaklarının azalttığı görülmektedir. FGNP arafazının arayüzeyde daha iyi fiber-matris yapışmasını sağlaması, fiber-matris arasındaki boşlukları doldurarak gelen kuvveti paylaşması ve kesintisiz aktarmasından kaynaklanmaktadır. Artan FGNP konsantrasyonu ile birlikte azalan bir yüzey hasar alanına sahiptir ve nüfuz eden floresans azalır ve dolayısıyla yüzey hasar yoğunluğu azalır.

24. FGNP nano katkısı ile daha derindeki yapay hataların termografi yöntemiyle tespit edilebilmesine olanak sağlamıştır. PT muayenesinin yapıldığı 20 °C ortam sıcaklığında katkısız kompozitte 5 kat (~ 1,6 mm) derinlikteki yapay hata tespit edilebilirken 1,5 FGNP nanokompozitinde 20 kat (~ 6,4 mm) derinlikteki yapay hata tespit edilebilmiştir. 46.5 °C' de yapılan LT kontrollerinde ise katkısız kompozitte 5 kat (~ 1.6mm) derinlikteki yapay hata çok açık ve 10 kat (~ 3.2 mm) derinlikteki yapay hata ise çok belirgin olmamakla beraber tespit edilebilmiştir. 0,5 FGNP katkılı nanokompozitlerde 10 kat (~ 3.2 mm) ve 15 kat (~ 4,8 mm) derinlikteki hatalar kolay algılanacak görünürlükteydi. 1 FGNP ve 1.5 FGNP katkılı nanokompozitlerde 10 kat (~ 3.2 mm) derinlikteki yapay hatalar çok net ve 15 kat (~ 4.8 mm) derinlikteki yapay hatalar kolay algılanacak görünürlükteydi. DSC analiz sonuçlarından da tespit edildiği üzere FGNP nano katkısı Tg'yi arttırmıştır ve SEM görüntülerinde de termal köprüler kurduğu doğrulanmıştır. FGNP nano katkı miktarının artması yapay ile hata kusursuz bölge arasındaki entropi farkının artmasına ve hatanın daha anlamlı tespit edilebilmesine olanak sağlamıştır. FGNP'nin oluşturduğu termal köprülerde ısı yolları oluşturan anyonik surfaktan (SDS) ve kovalent olmayan fonksiyonlaştırmayla termal köprülerin etrafında minimum oksidasyon

oluşturarak üstün termal iletkenlik elde etmek için arayüzey termal direncini azaltmada etkili olmuştur.

25. Termografi yöntemiyle hata tespiti ve termal yayılım haritalama tekniği ile IR termografisi, büyük ölçekli numuneleri verimli ve daha az hantal bir şekilde haritalama yeteneği nedeniyle benzersizdir. Şu anda, grafen/polimer arayüzündeki arayüzey termal direnci, modelleme bölümünde açıklandığı gibi grafen bazlı polimer nanokompozitlerin termal iletkenliğinin daha da geliştirilmesinde temel engellerden biridir. Ancak kovalent olmayan işlevselleştirme tekniği ile SDS' in epoxy matrisi ile oluşturduğu hidrojen bağları ve fiber ile oluşturduğu güçlü π - π bağları, üstün termal iletkenlik elde etmek için arayüzey termal direncini azaltmada umut verici olduğunu göstermiştir. FGNP/polimer arayüzü boyunca termal taşınım mekanizmaları SEM görüntüleri ile doğrulanmıştır.
26. Son olarak, FGNP'nin, havacılık CFRP'lerinin mekanik özelliklerini, termal ve elektrik iletkenliğini etkili bir şekilde arttırmak için CF-epoksi arayüz yapışmasını iyileştirme konusunda umut verici bir değiştirici olduğu gösterilmiştir. Üretilen nanokompozitin uçak üzerinde kullanılabilmesi malzemenin bütün özelliklerinin bir arada mukayese edilmesini gerektirecektir, dolayısıyla ağırlıkça % 1 FGNP nano katkısı içeren 1 FGNP isimli nanokompozit bütün özellikleriyle uçak üzerinde kullanılması en ideal üründür.

KAYNAKLAR

1. Cristina, B., Ion, D., Adriana, S., and George, P., "Nanocomposites as Advanced Materials for Aerospace Industry", *INCAS BULLETIN*, 4 (4): 57–72 (2012).
2. Ashori, A., Rahmani, H., and Bahrami, R., "Preparation and characterization of functionalized graphene oxide/carbon fiber/epoxy nanocomposites", *Polymer Testing*, 48: 82–88 (2015).
3. Cai, H. and Aref, A. J., "On the design and optimization of hybrid carbon fiber reinforced polymer-steel cable system for cable-stayed bridges", *Composites Part B: Engineering*, 68: 146–152 (2015).
4. Lou, T., Lopes, S. M. R., and Lopes, A. V., "Factors affecting moment redistribution at ultimate in continuous beams prestressed with external CFRP tendons", *Composites Part B: Engineering*, 66: 136–146 (2014).
5. Le, M. T. and Huang, S. C., "Thermal and mechanical behavior of hybrid polymer nanocomposite reinforced with graphene nanoplatelets", *Materials*, 8 (8): 5526–5536 (2015).
6. Li, J. and Zhang, J. G., "The influence of polyethylene-polyamine surface treatment of carbon nanotube on the TPB and friction and wear behavior of thermoplastic polyimide composite", *Polymer - Plastics Technology And Engineering*, 50 (10): 996–999 (2011).
7. Chozhan, C. K., Alagar, M., Sharmila, R. J., and Gnanasundaram, P., "Thermo mechanical behaviour of unsaturated polyester toughened epoxy-clay hybrid nanocomposites", *Journal Of Polymer Research*, 14 (4): 319–328 (2007).
8. Rahman, M. M., Zainuddin, S., Hosur, M. V., Malone, J. E., Salam, M. B. A., Kumar, A., and Jeelani, S., "Improvements in mechanical and thermo-mechanical properties of e-glass/epoxy composites using amino functionalized MWCNTs", *Composite Structures*, 94 (8): 2397–2406 (2012).
9. Song, Q., Li, K., Li, H., and Fu, Q., "Increasing the tensile property of unidirectional carbon/carbon composites by grafting carbon nanotubes onto carbon fibers by electrophoretic deposition", *Journal Of Materials Science And Technology*, 29 (8): 711–714 (2013).
10. Boroujeni, A. Y., Tehrani, M., Nelson, A. J., and Al-Haik, M., "Hybrid carbon nanotube-carbon fiber composites with improved in-plane mechanical properties", *Composites Part B: Engineering*, 66: 475–483 (2014).

11. Rhee, K. Y., Park, S. J., Hui, D., and Qiu, Y., "Effect of oxygen plasma-treated carbon fibers on the tribological behavior of oil-absorbed carbon/epoxy woven composites", **Composites Part B: Engineering**, 43 (5): 2395–2399 (2012).
12. Chong, H. M., Hinder, S. J., and Taylor, A. C., "Graphene nanoplatelet-modified epoxy: effect of aspect ratio and surface functionality on mechanical properties and toughening mechanisms", **Journal Of Materials Science**, 51 (19): 8764–8790 (2016).
13. Wang, C., Guo, L., Xia, Y., Zhang, C., Sang, X., Xu, C., Zhu, G., Ji, H., Zhao, P., Fang, H., Peng, Z., and Zhang, X., "Flexural performance and damage evolution of multiple fiberglass-reinforced UV-CIPP composite materials-- A view from mechanics and energy release", **Journal Of Materials Research And Technology**, 29: 3317–3339 (2024).
14. Rajeswari, A., Jackcina Stobel Christy, E., Gopi, S., Jayaraj, K., and Pius, A., "Characterization studies of polymer-based composites related to functionalized filler-matrix interface", *Interfaces in Particle and Fibre Reinforced Composites: Current Perspectives on Polymer, Ceramic, Metal and Extracellular Matrices*, **Elsevier**, 219–250 (2019).
15. Cakir, M. V. and Kinay, D., "MWCNT, nano-silica, and nano-clay additives effects on adhesion performance of dissimilar materials bonded joints", **Polymer Composites**, 42 (11): 5880–5892 (2021).
16. Zhai, L. L., Ling, G. P., and Wang, Y. W., "Effect of nano-Al₂O₃ on adhesion strength of epoxy adhesive and steel", **International Journal Of Adhesion And Adhesives**, 28 (1–2): 23–28 (2008).
17. Yasmin, A. and Daniel, I. M., "Mechanical and thermal properties of graphite platelet/epoxy composites", **Polymer**, 45 (24): 8211–8219 (2004).
18. Nilagiri Balasubramanian, K. B. and Ramesh, T., "Role, effect, and influences of micro and nano-fillers on various properties of polymer matrix composites for microelectronics: A review", **Polymers For Advanced Technologies**, 29 (6): 1568–1585 (2018).
19. Zena, Y. G., Woldemariam, M. H., and Koricho, E. G., "Nano-additives and their effects on the microwave absorptions and mechanical properties of the composite materials", **Manufacturing Review**, 10: (2023).
20. Jiang, H., Xie, Y., Zhu, R., Luo, Y., Sheng, X., Xie, D., and Mei, Y., "Construction of polyphosphazene-functionalized Ti₃C₂TX with high efficient flame retardancy for epoxy and its synergetic mechanisms", **Chemical Engineering Journal**, 456: (2023).
21. Gan, J., Li, F., Li, K., Li, E., and Li, B., "Dynamic failure of 3D printed negative-stiffness meta-sandwich structures under repeated impact loadings", **Composites Science And Technology**, 234: (2023).

22. Jiang, H., Li, J., Xie, Y., Du, Y., Zhao, J., Mei, Y., and Xie, D., "Rapid exfoliation and surface hydroxylation of high-quality boron nitride nanosheets enabling waterborne polyurethane with high thermal conductivity and flame retardancy", ***Advanced Composites And Hybrid Materials***, 7 (1): (2024).
23. Su, Y., Shen, Z., Long, X., Chen, C., Qi, L., and Chao, X., "Gaussian filtering method of evaluating the elastic/elasto-plastic properties of sintered nanocomposites with quasi-continuous volume distribution", ***Materials Science And Engineering: A***, 872: (2023).
24. Yao, X., Gao, X., Jiang, J., Xu, C., Deng, C., and Wang, J., "Comparison of carbon nanotubes and graphene oxide coated carbon fiber for improving the interfacial properties of carbon fiber/epoxy composites", ***Composites Part B: Engineering***, 132: 170–177 (2018).
25. An, F., Lu, C., Li, Y., Guo, J., Lu, X., Lu, H., He, S., and Yang, Y., "Preparation and characterization of carbon nanotube-hybridized carbon fiber to reinforce epoxy composite", ***Materials And Design***, 33 (1): 197–202 (2012).
26. Bekyarova, E., Thostenson, E. T., Yu, A., Kim, H., Gao, J., Tang, J., Hahn, H. T., Chou, T. W., Itkis, M. E., and Haddon, R. C., "Multiscale carbon nanotube-carbon fiber reinforcement for advanced epoxy composites", ***Langmuir***, 23 (7): 3970–3974 (2007).
27. Gokul Ganesh, M., Lavenya, K., Kirubashini, K. A., Ajeesh, G., Bhowmik, S., Epaarachchi, J. A., and Yuan, X., "Electrically conductive nano adhesive bonding: Futuristic approach for satellites and electromagnetic interference shielding", ***Advances In Aircraft And Spacecraft Science***, 4 (6): 729–744 (2017).
28. Zhou, Y., Pervin, F., Rangari, V. K., and Jeelani, S., "Fabrication and evaluation of carbon nano fiber filled carbon/epoxy composite", ***Materials Science And Engineering: A***, 426 (1–2): 221–228 (2006).
29. Kim, Y. A., Kamio, S., Tajiri, T., Hayashi, T., Song, S. M., Endo, M., Terrones, M., and Dresselhaus, M. S., "Enhanced thermal conductivity of carbon fiber/phenolic resin composites by the introduction of carbon nanotubes", ***Applied Physics Letters***, 90 (9): (2007).
30. Ortiz Balbuena, J., Tutor De Ureta, P., Rivera Ruiz, E., and Mellor Pita, S., "Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films", ***Medicina Clinica***, 146 (2): 93–94 (2016).
31. Yue, L., Pircheraghi, G., Monemian, S. A., and Manas-Zloczower, I., "Epoxy composites with carbon nanotubes and graphene nanoplatelets – Dispersion and synergy effects", ***Carbon***, 78: 268–278 (2014).
32. Saurín, N., Sanes, J., and Bermúdez, M. D., "Effect of graphene and ionic liquid additives on the tribological performance of epoxy resin", ***Tribology Letters***, 56 (1): 133–142 (2014).

33. Yue, L., Pircheraghi, G., Monemian, S. A., and Manas-Zloczower, I., "Epoxy composites with carbon nanotubes and graphene nanoplatelets - Dispersion and synergy effects", *Carbon*, 78: 268–278 (2014).
34. Hua, Y., Li, F., Hu, N., and Fu, S. Y., "Frictional characteristics of graphene oxide-modified continuous glass fiber reinforced epoxy composite", *Composites Science And Technology*, 223: (2022).
35. Wajid, A. S., Tanvir Ahmed, H. S., Das, S., Irin, F., Jankowski, A. F., and Green, M. J., "High-performance pristine graphene/epoxy composites with enhanced mechanical and electrical properties", *Macromolecular Materials And Engineering*, 298 (3): 339–347 (2013).
36. Wu, H. and Drzal, L. T., "Graphene nanoplatelet paper as a light-weight composite with excellent electrical and thermal conductivity and good gas barrier properties", *Carbon*, 50 (3): 1135–1145 (2012).
37. Park, O. K., Kim, S. G., You, N. H., Ku, B. C., Hui, D., and Lee, J. H., "Synthesis and properties of iodo functionalized graphene oxide/polyimide nanocomposites", *Composites Part B: Engineering*, 56: 365–371 (2014).
38. Lu, H., Yao, Y., Huang, W. M., and Hui, D., "Noncovalently functionalized carbon fiber by grafted self-assembled graphene oxide and the synergistic effect on polymeric shape memory nanocomposites", *Composites Part B: Engineering*, 67: 290–295 (2014).
39. Lee, J. H., Marroquin, J., Rhee, K. Y., Park, S. J., and Hui, D., "Cryomilling application of graphene to improve material properties of graphene/chitosan nanocomposites", *Composites Part B: Engineering*, 45 (1): 682–687 (2013).
40. Bagheri, R., Marouf, B. T., and Pearson, R. A., "Rubber-toughened epoxies: A critical review", *Polymer Reviews*, 49 (3): 201–225 (2009).
41. Sprenger, S., "Epoxy resins modified with elastomers and surface-modified silica nanoparticles", *Polymer*, 54 (18): 4790–4797 (2013).
42. Odegard, G. M., "Computational multiscale modeling - Nanoscale to macroscale", *Comprehensive Composite Materials II*, *Elsevier*, 45–46 (2017).
43. Kuan, C.-F., Chiang, C.-L., Lin, S.-H., Huang, W.-G., Hsieh, W.-Y., and Shen, M.-Y., "Kuan-et-al-2018-characterization-and-properties-of-graphene-nanoplatelets-xnbr-nanocomposites", *Polymers & Polymer Composites*, 26 (1): 59–68 (2018).
44. Pekturk, H. Y., Elitas, M., Goktas, M., Demir, B., and Birhanu, S., "Evaluation of the effect of MWCNT amount and dispersion on bending fatigue properties of non-crimp CFRP composites", *Engineering Science And Technology, An International Journal*, 34: (2022).

45. Wei, J., Atif, R., Vo, T., and Inam, F., "Graphene Nanoplatelets in Epoxy System: Dispersion, Reaggregation, and Mechanical Properties of Nanocomposites", *Journal Of Nanomaterials*, 2015: (2015).
46. Qin, W., Vautard, F., Drzal, L. T., and Yu, J., "Mechanical and electrical properties of carbon fiber composites with incorporation of graphene nanoplatelets at the fiber-matrix interphase", *Composites Part B: Engineering*, 69: 335–341 (2015).
47. He, W., Zhang, W., Li, Y., and Jing, X., "A high concentration graphene dispersion stabilized by polyaniline nanofibers", *Synthetic Metals*, 162 (13–14): 1107–1113 (2012).
48. Liu, S., Fang, Z., Yan, H., Chevali, V. S., and Wang, H., "Synergistic flame retardancy effect of graphene nanosheets and traditional retardants on epoxy resin", *Composites Part A: Applied Science And Manufacturing*, 89: 26–32 (2016).
49. Yu, G. and Wu, P., "Effect of chemically modified graphene oxide on the phase separation behaviour and properties of an epoxy/polyetherimide binary system", *Polymer Chemistry*, 5 (1): 96–104 (2014).
50. Amiri, A., Sadri, R., Shanbedi, M., Ahmadi, G., Chew, B. T., Kazi, S. N., and Dahari, M., "Performance dependence of thermosyphon on the functionalization approaches: An experimental study on thermo-physical properties of graphene nanoplatelet-based water nanofluids", *Energy Conversion And Management*, 92: 322–330 (2015).
51. Yu, W., Sisi, L., Haiyan, Y., and Jie, L., "Progress in the functional modification of graphene/graphene oxide: A review", *RSC Advances*, 10 (26): 15328–15345 (2020).
52. Ibrahim, A., Ridha, S., Amer, A., Shahari, R., and Ganat, T., "Influence of degree of dispersion of noncovalent functionalized graphene nanoplatelets on rheological behaviour of aqueous drilling fluids", *International Journal Of Chemical Engineering*, 2019: (2019).
53. Goddard, E. D., "Polymer/surfactant interaction: Interfacial aspects", *Journal Of Colloid And Interface Science*, 256 (1): 228–235 (2002).
54. Jobe, A. H., "Mechanisms to explain surfactant responses", *Biology Of The Neonate*, 89 (4): 298–302 (2006).
55. Wang, L. cheng, Wang, H. yan, Zhu, Y. wen, Song, X. wang, Liu, S. juan, Liu, X., and Jiang, S. xiang, "Studies of Interfacial Activities of Four Kinds of Surfactants at Oil/Water Interface", *Journal Of Dispersion Science And Technology*, 33 (3): 374–379 (2012).
56. Gavallas, P., Savvas, D., and Stefanou, G., "Mechanical properties of graphene nanoplatelets containing random structural defects", *Mechanics Of Materials*, 180: (2023).

57. Gahrooee, T. R., Abbasi Moud, A., Danesh, M., and Hatzikiriakos, S. G., "Rheological characterization of CNC-CTAB network below and above critical micelle concentration (CMC)", *Carbohydrate Polymers*, 257: (2021).
58. Ji, J., Pan, G., and Zhang, W., "The importance of repulsive potential barriers for the dispersion of graphene using surfactants You may also like Role of Additive in Alkaline Slurries for Co CMP", *New J. Phys*, 12: 125008 (2010).
59. Poorsargol, M., Alimohammadian, M., Sohrabi, B., and Dehestani, M., "Dispersion of graphene using surfactant mixtures: Experimental and molecular dynamics simulation studies", *Applied Surface Science*, 464: 440–450 (2019).
60. Bilisik, K. and Akter, M., "Graphene nanoplatelets/epoxy nanocomposites: A review on functionalization, characterization techniques, properties, and applications", <https://doi.org/10.1177/07316844211049277>, 41 (3–4): 99–129 (2021).
61. Hsieh, A. G., Korkut, S., Punckt, C., and Aksay, I. A., "Dispersion stability of functionalized graphene in aqueous sodium dodecyl sulfate solutions", *Langmuir*, 29 (48): 14831–14838 (2013).
62. Hsieh, A. G., Punckt, C., Korkut, S., and Aksay, I. A., "Adsorption of sodium dodecyl sulfate on functionalized graphene measured by conductometric titration", *Journal Of Physical Chemistry B*, 117 (26): 7950–7958 (2013).
63. Burlatsky, S. F., Atrazhev, V. V., Dmitriev, D. V., Sultanov, V. I., Timokhina, E. N., Ugolkova, E. A., Tulyani, S., and Vincitore, A., "Surface tension model for surfactant solutions at the critical micelle concentration", *Journal Of Colloid And Interface Science*, 393 (1): 151–160 (2013).
64. Wołowicz, A. and Staszak, K., "Study of surface properties of aqueous solutions of sodium dodecyl sulfate in the presence of hydrochloric acid and heavy metal ions", *Journal Of Molecular Liquids*, 299: (2020).
65. Vishnyakov, A., Lee, M. T., and Neimark, A. V., "Prediction of the critical micelle concentration of nonionic surfactants by dissipative particle dynamics simulations", *Journal Of Physical Chemistry Letters*, 4 (5): 797–802 (2013).
66. Beyaz, A., Oh, W. S., and Reddy, V. P., "Ionic liquids as modulators of the critical micelle concentration of sodium dodecyl sulfate", *Colloids And Surfaces B: Biointerfaces*, 35 (2): 119–124 (2004).
67. Cortés, H., Hernández-Parra, H., Bernal-Chávez, S. A., Del Prado-Audelo, M. L., Caballero-Florán, I. H., Borbolla-Jiménez, F. V., González-Torres, M., Magaña, J. J., and Leyva-Gómez, G., "Non-ionic surfactants for stabilization of polymeric nanoparticles for biomedical uses", *Materials*, 14 (12): (2021).
68. Zu, S. Z., Zhou, D., and Han, B. H., "Supramolecular surface modification and dispersion of graphene in water and organic solvents", *Journal Of Nanoscience And Nanotechnology*, 13 (2): 946–953 (2013).

69. Geng, Y., Liu, M. Y., Li, J., Shi, X. M., and Kim, J. K., "Effects of surfactant treatment on mechanical and electrical properties of CNT/epoxy nanocomposites", ***Composites Part A: Applied Science And Manufacturing***, 39 (12): 1876–1883 (2008).
70. Zhao, L. and Gao, L., "Stability of multi-walled carbon nanotubes dispersion with copolymer in ethanol", ***Colloids And Surfaces A: Physicochemical And Engineering Aspects***, 224 (1–3): 127–134 (2003).
71. Njuguna, J., Vanli, O. A., and Liang, R., "A Review of Spectral Methods for Dispersion Characterization of Carbon Nanotubes in Aqueous Suspensions", ***Journal Of Spectroscopy***, 2015: (2015).
72. Njuguna, J., Vanli, O. A., and Liang, R., "A Review of Spectral Methods for Dispersion Characterization of Carbon Nanotubes in Aqueous Suspensions", ***Journal Of Spectroscopy***, 2015: 1–11 (2015).
73. Yu, J., Grossiord, N., Koning, C. E., and Loos, J., "Controlling the dispersion of multi-wall carbon nanotubes in aqueous surfactant solution", ***Carbon***, 45 (3): 618–623 (2007).
74. Rastogi, R., Kaushal, R., Tripathi, S. K., Sharma, A. L., Kaur, I., and Bharadwaj, L. M., "Comparative study of carbon nanotube dispersion using surfactants", ***Journal Of Colloid And Interface Science***, 328 (2): 421–428 (2008).
75. Habibnejad Korayem, A., Barati, M. R., Simon, G. P., Williams, T., Zhao, X. L., Stroeve, P., and Duan, W. H., "Transition and stability of copolymer adsorption morphologies on the surface of carbon nanotubes and implications on their dispersion", ***Langmuir***, 30 (33): 10035–10042 (2014).
76. Kaftelen-Odabaşı, H., Odabaşı, A., Özdemir, M., and Baydoğan, M., "A study on graphene reinforced carbon fiber epoxy composites: Investigation of electrical, flexural, and dynamic mechanical properties", ***Polymer Composites***, 44 (1): 121–135 (2023).
77. Imran, K. A. and Shivakumar, K. N., "Graphene-modified carbon/epoxy nanocomposites: Electrical, thermal and mechanical properties", ***Journal Of Composite Materials***, 53 (1): 93–106 (2019).
78. Sukur, E. F. and Onal, G., "Graphene nanoplatelet modified basalt/epoxy multi-scale composites with improved tribological performance", ***Wear***, 460–461: (2020).
79. Muralidhara, B., Babu, S. P. K., and Suresha, B., "Studies on the Role of Graphene Nanoplatelets on Mechanical Properties, Dynamic-mechanical and Thermogravimetric Analysis of Carbon-Epoxy Composites", ***Journal Of The Institution Of Engineers (India): Series D***, (2020).
80. Hossain, M. K., Chowdhury, M. M. R., and Bolden, N. W., "Optimized mechanical performance of carbon fiber-epoxy composite using

- aminofunctionalized graphene nanoplatelets", *ASME International Mechanical Engineering Congress And Exposition, Proceedings (IMECE)*, 9–2015: 1–7 (2015).
81. Zhang, B., Asmatulu, R., Soltani, S. A., Le, L. N., and Kumar, S. S. A., "Mechanical and thermal properties of hierarchical composites enhanced by pristine graphene and graphene oxide nanoinclusions", *Journal Of Applied Polymer Science*, 131 (19): (2014).
 82. Jeyranpour, F., Alahyarizadeh, G., and Minucheir, A., "The thermo-mechanical properties estimation of fullerene-reinforced resin epoxy composites by molecular dynamics simulation - A comparative study", *Polymer*, 88: 9–18 (2016).
 83. Keyte, J., Pancholi, K., and Njuguna, J., "Recent Developments in Graphene Oxide/Epoxy Carbon Fiber-Reinforced Composites", *Frontiers In Materials*, 6: (2019).
 84. Faragi, S., Hamedani, A., Alahyarizadeh, G., Minucheir, A., Aghaie, M., and Arab, B., "Mechanical properties of carbon nanotube- and graphene-reinforced Araldite LY/Aradur HY 5052 resin epoxy composites: a molecular dynamics study", *Journal Of Molecular Modeling*, 25 (7): (2019).
 85. Ashori, A., Rahmani, H., and Bahrami, R., "Preparation and characterization of functionalized graphene oxide/carbon fiber/epoxy nanocomposites", *Polymer Testing*, 48: 82–88 (2015).
 86. Namdev, A., Telang, A., and Purohit, R., "Effect of Graphene Nano Platelets on Mechanical and Physical Properties of Carbon Fibre/Epoxy Hybrid Composites", *Advances In Materials And Processing Technologies*, 8 (sup3): 1168–1181 (2022).
 87. Shokrieh, M. M., Ghoreishi, S. M., Esmkhani, M., and Zhao, Z., "Effects of graphene nanoplatelets and graphene nanosheets on fracture toughness of epoxy nanocomposites", *Fatigue And Fracture Of Engineering Materials And Structures*, 37 (10): 1116–1123 (2014).
 88. Shivakumar, H., Renukappa, N. M., Shivakumar, K. N., and Suresha, B., "The Reinforcing Effect of Graphene on the Mechanical Properties of Carbon-Epoxy Composites", *Open Journal Of Composite Materials*, 10 (02): 27–44 (2020).
 89. Kaftelen-Odabaşı, H., Odabaşı, A., Özdemir, M., and Baydoğan, M., "A study on graphene reinforced carbon fiber epoxy composites: Investigation of electrical, flexural, and dynamic mechanical properties", *Polymer Composites*, 44 (1): 121–135 (2023).
 90. Wei, J., Saharudin, M. S., Vo, T., and Inam, F., "Effects of surfactants on the properties of epoxy/graphene nanocomposites", *Journal Of Reinforced Plastics And Composites*, 37 (14): 960–967 (2018).

91. Jen, Y. M. and Huang, J. C., "Synergistic effect on the thermomechanical and electrical properties of epoxy composites with the enhancement of carbon nanotubes and graphene nano platelets", **Materials**, 12 (2): (2019).
92. Cordeiro, H. A. B., Bocardo, M. G., Penteado, N. C., Moraes, V. T. De, Lebrão, S. M. G., and Lebrão, G. W., "Thermal Characterization of Graphene Oxide-Epoxy Nanocomposites Produced by Aqueous Emulsion", **International Journal Of Materials And Metallurgical Engineering**, 12 (11): 609–613 (2018).
93. Ćirin, D. M., Poša, M. M., Krstonošić, V. S., and Milanović, M. L., "Konduktometrijsko ispitivanje mešovutih micela na-dodecilsulfata i nejonskog surfaktanta (Triton X-100, Tween 20, Tween 60, Tween 80 ili Tween 85) u vodenim rastvorima", **Hemijska Industrija**, 66 (1): 21–28 (2012).
94. Thostenson, E. T. and Chou, T. W., "Processing-structure-multi-functional property relationship in carbon nanotube/epoxy composites", **Carbon**, 44 (14): 3022–3029 (2006).
95. Shen, J., Huang, W., Wu, L., Hu, Y., and Ye, M., "The reinforcement role of different amino-functionalized multi-walled carbon nanotubes in epoxy nanocomposites", **Composites Science And Technology**, 67 (15–16): 3041–3050 (2007).
96. Ghosh, P. K., Kumar, K., and Chaudhary, N., "Influence of ultrasonic dual mixing on thermal and tensile properties of MWCNTs-epoxy composite", **Composites Part B: Engineering**, 77: 139–144 (2015).
97. Zakaria, M. R., Abdul Kudus, M. H., Md. Akil, H., and Mohd Thirmizir, M. Z., "Comparative study of graphene nanoparticle and multiwall carbon nanotube filled epoxy nanocomposites based on mechanical, thermal and dielectric properties", **Composites Part B: Engineering**, 119: 57–66 (2017).
98. Wang, F. and Cai, X., "Improvement of mechanical properties and thermal conductivity of carbon fiber laminated composites through depositing graphene nanoplatelets on fibers", **Journal Of Materials Science**, 54 (5): 3847–3862 (2019).
99. Rafiee, M., Nitzsche, F., Laliberte, J., Hind, S., Robitaille, F., and Labrosse, M. R., "Thermal properties of doubly reinforced fiberglass/epoxy composites with graphene nanoplatelets, graphene oxide and reduced-graphene oxide", **Composites Part B: Engineering**, 164: 1–9 (2019).
100. Lonjon, A., Demont, P., Dantras, E., and Lacabanne, C., "Electrical conductivity improvement of aeronautical carbon fiber reinforced polyepoxy composites by insertion of carbon nanotubes", **Journal Of Non-Crystalline Solids**, 358 (15): 1859–1862 (2012).
101. Kamaraj, M., Dodson, E. A., and Datta, S., "Thermal and viscoelastic behaviour of graphene nanoplatelets/flax fibre/epoxy composites", **Plastics, Rubber And Composites**, 50 (5): 219–227 (2021).

102. Zhang, C., Khorshidi, H., Najafi, E., and Ghasemi, M., "Fresh, mechanical and microstructural properties of alkali-activated composites incorporating nanomaterials: A comprehensive review", *Journal Of Cleaner Production*, 384: (2023).
103. Chen, L., Zhao, Y., Li, M., Li, L., Hou, L., and Hou, H., "Reinforced AZ91D magnesium alloy with thixomolding process facilitated dispersion of graphene nanoplatelets and enhanced interfacial interactions", *Materials Science And Engineering: A*, 804: (2021).
104. Shivakumar, H., Renukappa, N. M., Shivakumar, K. N., and Suresha, B., "The Reinforcing Effect of Graphene on the Mechanical Properties of Carbon-Epoxy Composites", *Open Journal Of Composite Materials*, 10 (02): 27–44 (2020).
105. Alsaadi, M., Younus, B., Erklig, A., Bulut, M., Bozkurt, O., and Sulaiman, B., "Effect of graphene nano-platelets on mechanical and impact characteristics of carbon/Kevlar reinforced epoxy hybrid nanocomposites", *Proceedings Of The Institution Of Mechanical Engineers, Part C: Journal Of Mechanical Engineering Science*, 235 (23): 7139–7151 (2021).
106. Qin, W., Vautard, F., Drzal, L. T., and Yu, J., "Mechanical and electrical properties of carbon fiber composites with incorporation of graphene nanoplatelets at the fiber-matrix interphase", *Composites Part B: Engineering*, 69: 335–341 (2015).
107. Geng, Y., Liu, M. Y., Li, J., Shi, X. M., and Kim, J. K., "Effects of surfactant treatment on mechanical and electrical properties of CNT/epoxy nanocomposites", *Composites Part A: Applied Science And Manufacturing*, 39 (12): 1876–1883 (2008).
108. Gresil, M., Wang, Z., Poutrel, Q. A., and Soutis, C., "Thermal Diffusivity Mapping of Graphene Based Polymer Nanocomposites", *Scientific Reports*, 7 (1): 1–10 (2017).
109. Taraghi, I., Łopato, P., Paszkiewicz, S., and Fereidoon, A., "State-of-the art non-destructive techniques for defects detection in nanocomposites foam-core sandwich panels containing carbon nanotubes: IR thermography and microwave imaging", *Polymer Testing*, 73 (December 2018): 352–358 (2019).
110. Choi, M., Park, J., Kim, W., and Kang, K., "Inspection of impact damage in honeycomb composite by EPSI, thermography and ultrasonic testing", *International Journal Of Modern Physics B*, 22 (9–11): 1033–1038 (2008).
111. Usamentiaga, R., Venegas, P., Guerediaga, J., Vega, L., Molleda, J., and Bulnes, F. G., "Infrared thermography for temperature measurement and non-destructive testing", *Sensors (Switzerland)*, 14 (7): 12305–12348 (2014).
112. Švantner, M., Muzika, L., Moskovchenko, A., Pereira, C. M. C., and Das, S., "Repeatability study of flash-pulse thermographic inspection of carbon-fiber composite samples", *Infrared Physics And Technology*, 126: (2022).

113. Lopez, F., De Paulo Nicolau, V., Ibarra-Castanedo, C., and Maldague, X., "Thermal-numerical model and computational simulation of pulsed thermography inspection of carbon fiber-reinforced composites", *International Journal Of Thermal Sciences*, 86: 325–340 (2014).
114. Meola, C. and Toscano°, C., "NonDestructive Evaluation of Carbon Fiber Reinforced Polymers with Ultrasonics and Infrared Thermography: An Overview on Historical Steps and Patents", *Recent Patents On Materials Science*, 5: 48–67 (2012).
115. Meola, C., Boccardi, S., and Carlomagno, G. maria, "Composite Materials in the Aeronautical Industry", *Infrared Thermography In The Evaluation Of Aerospace Composite Materials*, 1–24 (2017).
116. Meola, C., Boccardi, S., Carlomagno, G. M., Boffa, N. D., Monaco, E., and Ricci, F., "Nondestructive evaluation of carbon fibre reinforced composites with infrared thermography and ultrasonics", *Composite Structures*, 134: 845–853 (2015).
117. Strike, C., "11.flight Control | Flight Control Surfaces | Aircraft Flight Control System", IR Part-66 Aircraft Maintenance Licence Module 11 Structures and Systems of Turbine Engine Aircraft, 10–40 (2005).
118. Seabridge, A., Sadraey, M. H., Langton, R., Belobaba, P., and Cooper, J., "Aircraft Design: A Systems Engineering Approach", 1–12 (2012).
119. Vukobratović, M. and Stojić, R., "Stabilization of nominal motion", Modern Aircraft Flight Control, *Springer, Berlin, Heidelberg*, 156–227 (1988).
120. Strike, C., "ICAT Module 11 Turbine Powered Aircraft Systems", Berry Colloge International Centre for Aerospace Training, 7–32 (2005).
121. Serkan Akgül; Abdurrahman Hacıoğlu, "Gözetleme/Saldır Amaçlı Mini İnsansız Hava Aracı Tasarımı ve Üretimi", *Havacılık Ve Uzay Teknolojileri Dergisi*, 3: 1–6 (2010).
122. Özbek, E., Durmuş, S., Şöhret, Y., and Karakoç, H., "Elektrik Motorlu ve Yüksek Faydalı Yük Oranlı Mikro Sınıfı Bir İHA Tasarımı, Üretimi ve Testleri", *Sürdürülebilir Havacılık Araştırmaları Dergisi*, 1 (2): 80–91 (2016).
123. Parafes', S. G., "Design of unmanned aerial vehicle structure and stabilization system for aeroelastic stability", *Russian Aeronautics*, 58 (3): 271–278 (2015).
124. Bilgi, C., "Design , Production and Testing of a Fully-Carbon Fiber Composite Fixed Wing Unmanned Air Vehicle", (2018).
125. Otto, A., Agatz, N., Campbell, J., and Golden, B., "Optimization approaches for civil applications of unmanned aerial vehicles (UAVs) or aerial drones : A survey", *Wiley*, 00: 1–48 (2018).

126. Raymer, D., "Aircraft Design: A Conceptual Approach, Sixth Edition", ***Aircraft Design: A Conceptual Approach, Sixth Edition***, (2018).
127. Katunin, A., Dragan, K., and Dziendzikowski, M., "Damage identification in aircraft composite structures: A case study using various non-destructive testing techniques", ***Composite Structures***, 127: 1–9 (2015).
128. Taylor, R., Venkata Siva, S. B., and Rama Sreekanth, P. S., "Carbon matrix composites", *Comprehensive Composite Materials II*, ***Elsevier***, 339–378 (2017).
129. Srivastava, S. and Tiwari, R. K., "Synthesis of epoxy-TiO₂ nanocomposites: A study on sliding wear behavior, thermal and mechanical properties", ***International Journal Of Polymeric Materials And Polymeric Biomaterials***, 61 (13): 999–1010 (2012).
130. Kaya, A. İ., "Kompozit Malzemeler ve Özellikleri", ***Poliüretan Ve Kompozit Sanayi Dergisi***, 8 (January): 38–45 (2016).
131. Yastımoğlu, F. and Özkan, A., "Tekrarlanan Yükler Altında Kompozit Malzemelerin Yapılarının İncelenmesini Amaçlayan Deney Aygıtı Tasarımı", ***Düzce Üniversitesi Bilim Ve Teknoloji Dergisi***, 5: 56–66 (2017).
132. Khagendra Kumar, Y. and Singh Lohchab, D., "Influence of Aviation Fuel on Mechanical properties of Glass Fiber-Reinforced Plastic Composite", ***International Advanced Research Journal In Science, Engineering And Technology***, 3: (2016).
133. Balasubramanian, M., "Composite Materials and Processing", ***Taylor & Francis Group***, 3–92 (2014).
134. "15 - Fibre-polymer composites for aerospace structures and engines", *Introduction to Aerospace Materials*, ***Woodhead Publishing***, 338–393 (2012).
135. "İnternet: Alamy, "Metal Ceramic Polymer Composites Diagram Molecule Information Vector Illustration Stock Vector Image & Art"", ***https://www.alamy.com/metal-ceramic-polymer-composites-diagram-diagram-molecule-information-vector-illustration-image340968025.html*** (2024).
136. Mangalgiri, P. D., "Composite materials for aerospace applications", ***Bull. Mater. Sci***, 22 (3): 657–664 (1999).
137. Cho, J., Boccaccini, A. R., and Shaffer, M. S. P., "Ceramic matrix composites containing carbon nanotubes", ***Journal Of Materials Science***, 44 (8): 1934–1951 (2009).
138. Halbig, M. C., Jaskowiak, M. H., Kiser, J. D., and Zhu, D., "Evaluation of ceramic matrix composite technology for aircraft turbine engine applications", ***51st AIAA Aerospace Sciences Meeting Including The New Horizons Forum And Aerospace Exposition 2013***, (2013).

139. Padture, N. P., "Environmental degradation of high-temperature protective coatings for ceramic-matrix composites in gas-turbine engines", *Npj Materials Degradation*, 3 (1): (2019).
140. Mortensen, A. and Llorca, J., "Metal matrix composites", *Annual Review Of Materials Research*, 40: 243–270 (2010).
141. Sharma, A. K., Bhandari, R., Aherwar, A., and Rimašauskiene, R., "Matrix materials used in composites: A comprehensive study", (2020).
142. Peng, W. and Riedl, B., "Thermosetting Resins", *Journal Of Chemical Education*, 72: 5 (1995).
143. Jin, F. L., Li, X., and Park, S. J., "Synthesis and application of epoxy resins: A review", *Journal Of Industrial And Engineering Chemistry*, 29: 1–11 (2015).
144. Doğru, A., "Production and Characterization of Fiber Reinforced Polymer Composites by Additive Manufacturing Method", (2022).
145. Erden, S. and Ho, K., "Fiber reinforced composites", *Fiber Technology For Fiber-Reinforced Composites*, 51–79 (2017).
146. Kaya, A. İ., "Kompozit Malzemeler ve Özellikleri", *Poliüretan Ve Kompozit Sanayi Dergisi*, 8 (January): 38–45 (2016).
147. Prashanth, S., Km, S., Nithin K, and Sachhidananda S, "Fiber Reinforced Composites -A Review", *J Material Sci Eng*, 6: 341 (2017).
148. Baker, A. A., Dutton, S., and Kelly, D., "Composite Materials for Aircraft Structures", *AIAA Education Series*, 27–48 (2004).
149. Yang, H. H., "Kevlar Aramid Fiber - H. H. Yang", *Wiley*, 23–71 (1992).
150. Cheng, M., Chen, W., and Weerasooriya, T., "Mechanical properties of Kevlar® KM2 single fiber", *Journal Of Engineering Materials And Technology*, 127 (2): 197–203 (2005).
151. Mallick, P. K., "Fiber-Reinforced Composites: Materials, Manufacturing, and Design", Third. Ed., *CRC Press*, 42–58 (2007).
152. van de Werken, N., Tekinalp, H., Khanbolouki, P., Ozcan, S., Williams, A., and Tehrani, M., "Additively manufactured carbon fiber-reinforced composites: State of the art and perspective", *Additive Manufacturing*, 31: (2020).
153. Sidorina, A. I., "Manufacturers of Carbon Fabrics: An Overview", *Fibre Chemistry*, 52 (6): 383–393 (2021).
154. Shen, D. and Wu, Z., "A Method for Measuring the Orientation of Carbon Fiber Weave", *Fibers And Polymers*, 22 (12): 3501–3509 (2021).

155. Thanikai Vimal, J., Prakash, C., and Jebastin Rajwin, A., "Effect of Weave Parameters on the Tear Strength of Woven Fabrics", *Journal Of Natural Fibers*, 17 (9): 1239–1248 (2020).
156. Durgun, I., "Production of Carbon with Vacuum Infussion Method", *OTEKON'14*, (2014).
157. Elkington, M., Bloom, D., Ward, C., Chatzimichali, A., and Potter, K., "Hand layup: understanding the manual process", *Advanced Manufacturing: Polymer And Composites Science*, 1 (3): 138–151 (2015).
158. Wittman, C. and Shook, G. D., "Hand Lay-Up Techniques", *Handbook Of Composites*, 321–367 (1982).
159. Kuppusamy, R. R. P., Rout, S., and Kumar, K., "Advanced manufacturing techniques for composite structures used in aerospace industries", *Modern Manufacturing Processes*, 3–12 (2020).
160. Summerscales, J. and Grove, S., "Manufacturing methods for natural fibre composites", *Natural Fibre Composites: Materials, Processes and Applications*, Elsevier Inc., 176–215 (2013).
161. Azeem, M., Ya, H. H., Kumar, M., Stabla, P., Smolnicki, M., Gemi, L., Khan, R., Ahmed, T., Ma, Q., Sadique, M. R., Mokhtar, A. A., and Mustapha, M., "Application of Filament Winding Technology in Composite Pressure Vessels and Challenges: A Review", *Journal Of Energy Storage*, 49: (2022).
162. Früh, N. and Knippers, J., "Multi-stage filament winding: Integrative design and fabrication method for fibre-reinforced composite components of complex geometries", *Composite Structures*, 268: 113969 (2021).
163. Shrigandhi, G. D. and Kothavale, B. S., "Biodegradable composites for filament winding process", *Materials Today: Proceedings*, 42: 2762–2768 (2021).
164. Phelan, F. R., "Simulation of the injection process in resin transfer molding", *Polymer Composites*, 18 (4): 460–476 (1997).
165. Kang, M. K., Lee, W. I., and Hahn, H. T., "Analysis of vacuum bag resin transfer molding process", *Elsevier, Composites Part A: Applied Science And Manufacturing*, 32: 1553–1560 (2001).
166. "İnternet: Liquid Resin Transfer Molding (RTM) Injection Moulding", <https://www.ouest-composites.com/en/rtm-injection/> (2024).
167. Brouwer, W. D., Van Herpt, E. C. F. C., and Labordus, M., "Vacuum injection moulding for large structural applications", *Composites Part A: Applied Science And Manufacturing*, 34 (6 SPEC.): 551–558 (2003).
168. "İnternet: The SCRIMP Process", <https://pslc.ws/macrog/scrimp.htm> (2024).

169. Abdurohman, K., Satrio, T., Muzayadah, N. L., and Teten, "A comparison process between hand lay-up, vacuum infusion and vacuum bagging method toward e-glass EW 185/lycal composites", (2018).
170. "İnternet: Composites Technology-NSC STEM Pathways", <https://fi.cheaponline2024.ru/content?c=vacuum+bag+composite&id=15> (2024).
171. Kedward, K. T., "6.02 Generic Approaches and Issues for Structural Composite Design and Application", *Elsevier*, 15–28 (2000).
172. Ghori, S. W., Siakeng, R., Rasheed, M., Saba, N., and Jawaaid, M., "The role of advanced polymer materials in aerospace", *Sustainable Composites for Aerospace Applications, Elsevier*, 19–34 (2018).
173. BOEING, "Commercial Airplanes 777 Service Bulletin No: 777-78-0082", *BOEING*, 1: 1–265 (2011).
174. AIRBUS, "Airbus A350 XWB update", *Elsevier Reinforced Plastics*, 0034: 20–25 (2010).
175. Megson, T. H. G., "Aircraft Structures for Engineering Students", Sixth. Ed., *Todd Green, Elsevier*, 183–223 (2017).
176. Kesarwani, S., "Polymer Composites in Aviation Sector A Brief Review Article", (2017).
177. De Crescenzo, F., Fantini, M., Persiani, F., Stefano, L. Di, Azzari, P., and Salti, S., "Augmented Reality for Aircraft Maintenance Training and Operations Support", *IEEE Computer Society*, 96–101 (2011).
178. Usanmaz, O., "Training of the maintenance personnel to prevent failures in aircraft systems", *Engineering Failure Analysis*, 18 (7): 1683–1688 (2011).
179. Ferreira, L. M., "Study of the behaviour of non-crimp fabric laminates by 3D finite element models", (2012).
180. Bhat, A., Budholiya, S., Raj, S. A., Sultan, M. T. H., Hui, D., Shah, A. U. M., and Safri, S. N. A., "Review on nanocomposites based on aerospace applications", *Nanotechnology Reviews*, 10 (1): 237–253 (2021).
181. Kilmer, P. D., "Review Article: Review Article", *International Journal Of Advanced Engineering Technology*, 5 (3): 369–373 (2010).
182. Hassanzadeh-Aghdam, M. K., Ansari, R., and Deylami, H. M., "Influence of graphene nano-platelets on thermal transport performance of carbon fiber-polymer hybrid composites: Overall assessment of microstructural aspects", *International Journal Of Thermal Sciences*, 171 (August 2021): 107209 (2022).

183. Pektürk, H. Y., Demir, B., Bilgi, C., Öz, F., and Ersoy, N., "Effect of MWCNT on the properties of NCF-CFP hybrid composite fabricated via vacuum infusion", ***Journal Of Reinforced Plastics And Composites***, (2023).
184. Chava, V. S., "Study Of 4H-SiC And $Al_xGa_{1-x}N$ Based Heterojunction Devices For Ultraviolet Detection Applications", South Carolina, (2018).
185. Augustyn, S. and Markiewicz, M., "The Using of Nanocomposite Heating System For Aviation Desining", (2015).
186. "İnternet: Aerospace Industry Solutions at Best Price in Chennai", <https://www.indiamart.com/proddetail/aerospace-industry-solutions-17299676562.html> (2024).
187. AIRBUS, "Nanocomposites for Future Airbus Airframes Nano-ratio", ***AIRBUS***, 56: 6–28 (2008).
188. "İnternet: Kompozit Nedir? Kompozit Malzemeler ve Özellikleri", https://insapedia.com/kompozit-nedir-kompozit-malzemeler-ve-ozellikleri/#google_vignette (2024).
189. Njuguna, J., Pielichowski, K., and Fan, J., "Polymer nanocomposites for aerospace applications", *Advances in Polymer Nanocomposites: Types and Applications*, ***Woodhead Publishing Limited***, 472–539 (2012).
190. Rodríguez-Pérez, L., Herranz, Á., and Martín, N., "The chemistry of pristine graphene", ***Chemical Communications***, 49 (36): 3721–3735 (2013).
191. Kasım, H. and Demir, B., "Mechanical and electrical characterization of elastomer-based pressure sensors containing graphene filler material under cycled load", ***Journal Of The Faculty Of Engineering And Architecture Of Gazi University***, 37 (1): 407–422 (2022).
192. Yılmaz, H., Altın, Y., and Bedeloğlu, A., "Grafen Takviyeli Epoksi Nanokompozitlerin Özelliklerinin İncelenmesi", ***Journal Of Polytechnic***, 0900: 0–3 (2020).
193. Tiwari, S. K., Sahoo, S., Wang, N., and Huczko, A., "Graphene research and their outputs: Status and prospect", ***Journal Of Science: Advanced Materials And Devices***, 5 (1): 10–29 (2020).
194. Ray, S. C., "Application and Uses of Graphene Oxide and Reduced Graphene Oxide", *Applications of Graphene and Graphene-Oxide Based Nanomaterials*, ***Science Direct***, 39–52 (2015).
195. Moriche, R., Prolongo, S. G., Sánchez, M., Jiménez-Suárez, A., Sayagués, M. J., and Ureña, A., "Morphological changes on graphene nanoplatelets induced during dispersion into an epoxy resin by different methods", ***Composites Part B: Engineering***, 72: 199–205 (2015).

196. Cataldi, P., Athanassiou, A., and Bayer, I. S., "Graphene nanoplatelets-based advanced materials and recent progress in sustainable applications", ***Applied Sciences***, 8 (9): 2–35 (2018).
197. Accordino, S. R., Montes De Oca, J. M., Rodriguez Fris, J. A., and Appignanesi, G. A., "Hydrophilic behavior of graphene and graphene-based materials", ***Journal Of Chemical Physics***, 143 (15): (2015).
198. Wang, G., Wang, B., Park, J., Yang, J., Shen, X., and Yao, J., "Synthesis of enhanced hydrophilic and hydrophobic graphene oxide nanosheets by a solvothermal method", ***Carbon***, 47 (1): 68–72 (2009).
199. Hashmi, A., Nayak, V., Singh, K. R., Jain, B., Baid, M., Alexis, F., and Singh, A. K., "Potentialities of graphene and its allied derivatives to combat against SARS-CoV-2 infection", ***Materials Today Advances***, 13: (2022).
200. Gopal, J., Muthu, M., and Sivanesan, I., "A Comprehensive Compilation of Graphene/Fullerene Polymer Nanocomposites for Electrochemical Energy Storage", ***Polymers***, 15 (3): (2023).
201. Mohammad Salah JALAL, "PRODUCTION OF GRAPHENE Nanoco MATERIALS FOR INFRARED BLOCKING APPLICATION", (2018).
202. Bilsen BEŞERGİL, "Termal Analiz Yöntemleri", ***Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri***, 1 (1): 1–17 (2019).
203. Pang, L. S. K., Saxby, J. D., and Chatfield, S. P., "Thermogravimetric Analysis of Carbon Nanotubes and Nanoparticles", ***The Journal Of Physical Chemistry***, 97: (1993).
204. Macdonald, J. R. and Johnson, W. B., "Fundamentals of Impedance Spectroscopy", ***Impedance Spectroscopy***, 7: 1–20 (2018).
205. Mohammed, A. and Abdullah, A., "Scanning Electron Microscopy (SEM): A Review", (2018).
206. "Tensile Testing", 2nd Edition. Ed., ***ASM International, The Materials Information Society***, 1–12 (2004).
207. Saba, N., Jawaid, M., and Sultan, M. T. H., "An overview of mechanical and physical testing of composite materials", *Mechanical and Physical Testing of Biocomposites, Fibre-Reinforced Composites and Hybrid Composites*, ***Elsevier***, 1–12 (2018).
208. Dwivedi, S. K., Vishwakarma, M., and Soni, A., "Advances and Researches on Non Destructive Testing: A Review", ***Materials Today: Proceedings***, 5: 3690–3698 (2018).
209. Helal, J., Sofi, M., and Mendis, P., "Non-Destructive Testing of Concrete: A Review of Methods", ***Special Issue: Electronic Journal Of Structural Engineering***, 14 (1): 97–105 (2015).

210. Yağcı, T., Çidem, A., and Durmuş, H., "Geçmişten günümüze tahribatsız muayene yöntemleri", *M C B Ü Soma Meslek Yüksekokulu Teknik Bilimler Dergisi*, 3 (27): 49–57 (2018).
211. Uludağ, A., "Bir Uçak Ana İniş Takımı Jantının Sıvı Penetrant Kontrol Yöntemi ile İncelenmesi", *Journal Of Aviation*, 1 (2): 129–129 (2017).
212. Chris Roshan, C., Raghul, C., Vasanth Ram, H., Suraj, K. P., and Solomon, J., "Non-destructive testing by liquid penetrant testing and ultrasonic testing-A review", *International Journal Of Advance Research, Ideas And Innovations In Technology*, 5 (2): 694–697 (2019).
213. Cahit Bilgi, "Uçaklarda Kullanılan Al2024 Alaşımlarında Ve Karbon Fiber Kompozitlerinde Termografi Yönteminin Uygulanabilirliğinin Deneysel İncelenmesi", *Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Entitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, (2015).
214. Ciampa, F., Mahmoodi, P., Pinto, F., and Meo, M., "Recent advances in active infrared thermography for non-destructive testing of aerospace components", *Sensors*, 18 (2): 1–37 (2018).
215. Montesano, J., Bougherara, H., and Fawaz, Z., "Application of infrared thermography for the characterization of damage in braided carbon fiber reinforced polymer matrix composites", *Composites Part B: Engineering*, 60: 137–143 (2014).
216. Bates, D., Smith, G., Lu, D., and Hewitt, J., "Rapid thermal non-destructive testing of aircraft components", *Elsevier, Composites Part B: Engineering*, 31: 175–185 (2000).
217. Pickering, S. and Almond, D., "Matched excitation energy comparison of the pulse and lock-in thermography NDE techniques", *NDT And E International*, 41 (7): 501–509 (2008).
218. Liu, H., Li, W., Yang, L., Deng, K., and Zhao, Y., "Automatic reconstruction of irregular shape defects in pulsed thermography using deep learning neural network", *Neural Computing And Applications*, 34 (24): 21701–21714 (2022).
219. Giri, L. I., Tuli, S., Sharma, M., Bugnon, P., Berger, H., and Magrez, A., "Thermal diffusivity measurements of templated nanocomposite using infrared thermography", *Materials Letters*, 115: 106–108 (2014).
220. Ibarra-Castanedo, C., Tarpani, J. R., and Maldague, X. P. V., "Nondestructive testing with thermography", *European Journal Of Physics*, 34 (6): 91–109 (2013).
221. Larbi, W. Ben, Ibarra-Castanedo, C., Klein, M., Bendada, A., and Maldague, X., "Experimental Comparison of Lock-in and Pulsed Thermography for the Nondestructive Evaluation of Aerospace Materials", (2009).

222. Sanjeev Kumar, S., Ramesh Kumar, M., Sudheendra, H. N., and Sathish, R., "Pulse phase thermographic non-destructive evaluation of composite aircraft structures", *Insight: Non-Destructive Testing And Condition Monitoring*, 53 (6): 312–315 (2011).
223. Vinothini, K. and Rajan, M., "Mechanism for the Nano-Based Drug Delivery System", *Characterization and Biology of Nanomaterials for Drug Delivery: Nanoscience and Nanotechnology in Drug Delivery*, Elsevier Inc., 236–240 (2018).
224. Plastinin, I. V., Burikov, S. A., Gofurov, S. P., Ismailova, O. B., Mirgorod, Y. A., and Dolenko, T. A., "Features of self-organization of sodium dodecyl sulfate in water-ethanol solutions: Theory and vibrational spectroscopy", *Journal Of Molecular Liquids*, 298: (2020).
225. Alamier, W. M., Tasneem, S., Nabi, A., Hasan, N., and Nabi, F., "Thermodynamic and Spectroscopic Studies of SDS in Cinnamaldehyde + Ethanol Mixtures: Influences of Temperature and Composition", *Applied Sciences (Switzerland)*, 12 (23): (2022).
226. Liu, J. Q., Xiao, T., Liao, K., and Wu, P., "Interfacial design of carbon nanotube polymer composites: A hybrid system of noncovalent and covalent functionalizations", *Nanotechnology*, 18 (16): (2007).
227. Cha, J., Jin, S., Shim, J. H., Park, C. S., Ryu, H. J., and Hong, S. H., "Functionalization of carbon nanotubes for fabrication of CNT/epoxy nanocomposites", *Materials And Design*, 95: 1–8 (2016).
228. Zhang, T., Wang, W., Yan, Z., and Zhang, J., "Interfacial Morphology and Bonding Mechanism of Explosive Weld Joints", *Chinese Journal Of Mechanical Engineering (English Edition)*, 34 (1): (2021).
229. Siddiqui, N. A., Khan, S. U., Ma, P. C., Li, C. Y., and Kim, J. K., "Manufacturing and characterization of carbon fibre/epoxy composite prepregs containing carbon nanotubes", *Composites Part A: Applied Science And Manufacturing*, 42 (10): 1412–1420 (2011).
230. Park, J. G., Cheng, Q., Lu, J., Bao, J., Li, S., Tian, Y., Liang, Z., Zhang, C., and Wang, B., "Thermal conductivity of MWCNT/epoxy composites: The effects of length, alignment and functionalization", *Carbon*, 50 (6): 2083–2090 (2012).
231. Zakaria, M. R., Abdul Kudus, M. H., Md. Akil, H., and Mohd Thirmizir, M. Z., "Comparative study of graphene nanoparticle and multiwall carbon nanotube filled epoxy nanocomposites based on mechanical, thermal and dielectric properties", *Composites Part B: Engineering*, 119: 57–66 (2017).
232. Galpaya, D., Wang, M., Liu, M., Motta, N., Waclawik, E., and Yan, C., "Recent Advances in Fabrication and Characterization of Graphene-Polymer Nanocomposites", *Graphene*, 01 (02): 30–49 (2012).

233. Uddin, M. E., Kuila, T., Nayak, G. C., Kim, N. H., Ku, B. C., and Lee, J. H., "Effects of various surfactants on the dispersion stability and electrical conductivity of surface modified graphene", *Journal Of Alloys And Compounds*, 562: 134–142 (2013).
234. Nazari, B., Ranjbar, Z., Hashjin, R. R., Rezvani Moghaddam, A., Momen, G., and Ranjbar, B., "Dispersing graphene in aqueous media: Investigating the effect of different surfactants", *Colloids And Surfaces A: Physicochemical And Engineering Aspects*, 582: (2019).
235. Sulong, A. B., Muhamad, N., Sahari, J., Ramli, R., Deros, B. M., and Park, J., "Electrical Conductivity Behaviour of Chemical Functionalized MWCNTs Epoxy Nanocomposites", *European Journal Of Scientific Research*, 29 (1): 13–21 (2009).
236. Dresselhaus, M. S., Dresselhaus, G., Eklund, P. C., and Rao, A. M., "Carbon Nanotubes", *The Physics of Fullerene-Based and Fullerene-Related Materials*, **Springer, Dordrecht**, 331–379 (2000).
237. Eksik, O., Bartolucci, S. F., Gupta, T., Fard, H., Borca-Tasciuc, T., and Koratkar, N., "A novel approach to enhance the thermal conductivity of epoxy nanocomposites using graphene core-shell additives", *Carbon*, 101: 239–244 (2016).
238. Stankovich, S., Dikin, D. A., Dommett, G. H. B., Kohlhaas, K. M., Zimney, E. J., Stach, E. A., Piner, R. D., Nguyen, S. B. T., and Ruoff, R. S., "Graphene-based composite materials", *Nature* **2006 442:7100**, 442 (7100): 282–286 (2006).
239. Wee Chun, W., Pei Leng, T., Cheow Keat, Y., Fazlina, A., Bee Ying, L., and Syahmie Mohamad Rasidi, M., "Effect of dispersing agents on the electrical and mechanical performance of GNPs filled epoxy nanocomposite", *International Journal Of Nanoelectronics And Materials*, 16 (3): (2023).
240. Mehrali, M., Sadeghinezhad, E., Latibari, S. T., Kazi, S. N., Mehrali, M., Bin, M. N., Zubir, M., Simon, H., and Metselaar, C., "Investigation of thermal conductivity and rheological properties of nanofluids containing graphene nanoplatelets", *Springer, Nanoscale Research Letters*, (2014).
241. Meschi Amoli, B., Trinidad, J., Rivers, G., Sy, S., Russo, P., Yu, A., Zhou, N. Y., and Zhao, B., "SDS-stabilized graphene nanosheets for highly electrically conductive adhesives", *Carbon*, 91: 188–199 (2015).
242. Liu, W. and Guo, R., "Interaction between morin and sodium dodecyl sulfate (SDS) micelles", *Journal Of Agricultural And Food Chemistry*, 53 (8): 2890–2896 (2005).
243. Sayed, M. S., Bakr, M. F., Salama, T. M., El Dakrory, A. M., Ibrahim, I. A., and Maree, R. M., "A comparative study of SDS-and DSS-functionalized graphene as adsorbents for removal of 137 Cs ions from low level radioactive waste", *Global Journal Of Chemistry*, 3 (1): (2016).

244. Yang, S. Y., Lin, W. N., Huang, Y. L., Tien, H. W., Wang, J. Y., Ma, C. C. M., Li, S. M., and Wang, Y. S., "Synergetic effects of graphene platelets and carbon nanotubes on the mechanical and thermal properties of epoxy composites", **Carbon**, 49 (3): 793–803 (2011).
245. Wang, F. and Cai, X., "Improvement of mechanical properties and thermal conductivity of carbon fiber laminated composites through depositing graphene nanoplatelets on fibers", **Journal Of Materials Science**, 54 (5): 3847–3862 (2019).
246. Zakaria, M. R., Abdul Kudus, M. H., Md. Akil, H., and Mohd Thirmizir, M. Z., "Comparative study of graphene nanoparticle and multiwall carbon nanotube filled epoxy nanocomposites based on mechanical, thermal and dielectric properties", **Composites Part B: Engineering**, 119: 57–66 (2017).
247. Pathak, A. K., Garg, H., Singh, M., Yokozeki, T., and Dhakate, S. R., "Enhanced interfacial properties of graphene oxide incorporated carbon fiber reinforced epoxy nanocomposite: a systematic thermal properties investigation", **Journal Of Polymer Research**, 26 (2): (2019).
248. Rafiee, M., Nitzsche, F., Laliberte, J., Hind, S., Robitaille, F., and Labrosse, M. R., "Thermal properties of doubly reinforced fiberglass/epoxy composites with graphene nanoplatelets, graphene oxide and reduced-graphene oxide", **Composites Part B: Engineering**, 164: 1–9 (2019).
249. Jamali, N., Rezvani, A., Khosravi, H., and Tohidlou, E., "On the mechanical behavior of basalt fiber/epoxy composites filled with silanized graphene oxide nanoplatelets", **Polymer Composites**, 39: E2472–E2482 (2018).
250. Yanardag, D., Ahmetli, G., Karaman, M., and Kocaman, S., "Pecvd application to obtain polymer coated graphene nanoplatelets and development of new epoxy nanocomposites", **Express Polymer Letters**, 16 (1): 2–20 (2022).
251. Shaheryar Agha, Khan Sajid, Qaiser Haroon, Khurram Aqeel Ahsan and, and Subhani Tayyab, "Mechanical and thermal properties of hybrid carbon fibre–phenolic matrix composites containing graphene nanoplatelets and graphite powder", (2017).
252. Osman, A., Elhakeem, A., Kaytbay, S., and Ahmed, A., "Thermal, electrical and mechanical properties of graphene/nano-alumina/epoxy composites", **Materials Chemistry And Physics**, 257: (2021).
253. Zeng, C., Lu, S., Xiao, X., Gao, J., Pan, L., He, Z., and Yu, J., "Enhanced thermal and mechanical properties of epoxy composites by mixing noncovalently functionalized graphene sheets", **Polymer Bulletin**, 72 (3): 453–472 (2015).
254. Chen, L., Jin, H., Xu, Z., Shan, M., Tian, X., Yang, C., Wang, Z., and Cheng, B., "A design of gradient interphase reinforced by silanized graphene oxide and its effect on carbon fiber/epoxy interface", **Materials Chemistry And Physics**, 145 (1–2): 186–196 (2014).

255. Li, K. Y., Kuan, C. F., Kuan, H. C., Chen, C. H., Shen, M. Y., Yang, J. M., and Chiang, C. L., "Preparation and properties of novel epoxy/graphene oxide nanosheets (GON) composites functionalized with flame retardant containing phosphorus and silicon", *Materials Chemistry And Physics*, 146 (3): 354–362 (2014).
256. Huang, P., Zhu, H., Jing, L., Zhao, Y., and Gao, X., "Graphene covalently binding aryl groups: Conductivity increases rather than decreases", *ACS Nano*, 5 (10): 7945–7949 (2011).
257. Fang, X. Y., Yu, X. X., Zheng, H. M., Jin, H. B., Wang, L., and Cao, M. S., "Temperature- and thickness-dependent electrical conductivity of few-layer graphene and graphene nanosheets", *Physics Letters, Section A: General, Atomic And Solid State Physics*, 379 (37): 2245–2251 (2015).
258. Saberi, M., Ansari, R., and Hassanzadeh-Aghdam, M. K., "Predicting the electrical conductivity of short carbon fiber/graphene nanoplatelet/polymer composites", *Materials Chemistry And Physics*, 309: (2023).
259. Elmarakbi, A., Ciardiello, R., Tridello, A., Innocente, F., Martorana, B., Bertocchi, F., Cristiano, F., Elmarakbi, M., and Belingardi, G., "Effect of graphene nanoplatelets on the impact response of a carbon fibre reinforced composite", *Materials Today Communications*, 25: (2020).
260. Han, S., Zhang, X., Wang, P., Dai, J., Guo, G., Meng, Q., and Ma, J., "Mechanically robust, highly sensitive and superior cycling performance nanocomposite strain sensors using 3-nm thick graphene platelets", *Polymer Testing*, 98: (2021).
261. Abd El-baky, M. A., Hegazy, D. A., and Hassan, M. A., "Advanced Thin-walled Composite Structures for Energy Absorption Applications", *Applied Composite Materials*, 29 (3): 1195–1233 (2022).
262. Papageorgiou, D. G., Kinloch, I. A., and Young, R. J., "Mechanical properties of graphene and graphene-based nanocomposites", *Progress In Materials Science*, 90: 75–127 (2017).
263. Shen, M. Y., Chang, T. Y., Hsieh, T. H., Li, Y. L., Chiang, C. L., Yang, H., and Yip, M. C., "Mechanical properties and tensile fatigue of graphene nanoplatelets reinforced polymer nanocomposites", *Journal Of Nanomaterials*, 2013: (2013).
264. Kamar, N. T., Hossain, M. M., Khomenko, A., Haq, M., Drzal, L. T., and Loos, A., "Interlaminar reinforcement of glass fiber/epoxy composites with graphene nanoplatelets", *Composites Part A: Applied Science And Manufacturing*, 70: 82–92 (2015).
265. Elmarakbi, A., Ciardiello, R., Tridello, A., Innocente, F., Martorana, B., Bertocchi, F., Cristiano, F., Elmarakbi, M., and Belingardi, G., "Effect of graphene nanoplatelets on the impact response of a carbon fibre reinforced composite", *Materials Today Communications*, 25: (2020).

266. Doğan, N. F., Bulut, M., Erklığ, A., and Bozkurt, O. Y., "Mechanical and low velocity impact characterization of carbon/glass hybrid composites with graphene nanoplatelets", *Materials Research Express*, 6 (8): (2019).
267. Namdev, A., Telang, A., and Purohit, R., "Effect of Graphene Nano Platelets on Mechanical and Physical Properties of Carbon Fibre/Epoxy Hybrid Composites", *Advances In Materials And Processing Technologies*, 8 (sup3): 1168–1181 (2022).
268. Ilyas, S. U., Ridha, S., and Abdul Kareem, F. A., "Dispersion stability and surface tension of SDS-Stabilized saline nanofluids with graphene nanoplatelets", *Colloids And Surfaces A: Physicochemical And Engineering Aspects*, 592: (2020).
269. Molazemhosseini, A., Tourani, H., Khavandi, A., and Eftekhari Yekta, B., "Tribological performance of PEEK based hybrid composites reinforced with short carbon fibers and nano-silica", *Wear*, 303 (1–2): 397–404 (2013).
270. Sarwar, A., Mahboob, Z., Zdero, R., and Bougherara, H., "Mechanical characterization of a new Kevlar/Flax/epoxy hybrid composite in a sandwich structure", *Polymer Testing*, 90: (2020).
271. Wazalwar, R., Sahu, M., and Raichur, A. M., "Mechanical properties of aerospace epoxy composites reinforced with 2D nano-fillers: current status and road to industrialization", *Nanoscale Advances*, 3 (10): 2741–2776 (2021).
272. Li, Z., Chu, J., Yang, C., Hao, S., Bissett, M. A., Kinloch, I. A., and Young, R. J., "Effect of functional groups on the agglomeration of graphene in nanocomposites", *Composites Science And Technology*, 163: 116–122 (2018).
273. Wang, F. and Cai, X., "Improvement of mechanical properties and thermal conductivity of carbon fiber laminated composites through depositing graphene nanoplatelets on fibers", *Journal Of Materials Science*, 54 (5): 3847–3862 (2019).
274. Awan, F. S., Fakhar, M. A., Khan, L. A., and Subhani, T., "Study of Interfacial Properties of Carbon Fiber Epoxy Matrix Composites Containing Graphene Nanoplatelets", *Fibers And Polymers*, 20 (3): 633–641 (2019).
275. Umer, R., "Manufacturing and mechanical properties of graphene coated glass fabric and epoxy composites", *Journal Of Composites Science*, 2 (2): (2018).
276. Chiou, Y. C., Chou, H. Y., and Shen, M. Y., "Effects of adding graphene nanoplatelets and nanocarbon aerogels to epoxy resins and their carbon fiber composites", *Materials And Design*, 178: (2019).
277. Korkees, F., Morris, E., Jarrett, W., and Swart, R., "Characterization of moisture absorption and flexural performance of functionalized graphene modified carbon fiber composites under low energy impact", *Polymer Composites*, 44 (6): 3325–3340 (2023).

278. Zhou, G., Zhang, Z., Yin, W., Chen, H., Wang, L., Wang, D., and Ma, H., "Surface defect detection of CFRP materials based on infrared thermography and Attention U-Net algorithm", ***Nondestructive Testing And Evaluation***, 39 (2): 238–257 (2024).
279. Manta, A., Gresil, M., and Soutis, C., "Infrared thermography for void mapping of a graphene/epoxy composite and its full-field thermal simulation", ***Fatigue And Fracture Of Engineering Materials And Structures***, 42 (7): 1441–1453 (2019).
280. Baek, Y. M., Shin, P. S., Kim, J. H., Park, H. S., DeVries, K. L., and Park, J. M., "Thermal transfer, interfacial, and mechanical properties of carbon fiber/polycarbonate-CNT composites using infrared thermography", ***Polymer Testing***, 81: (2020).



ÖZGEÇMİŞ

Adı SOYADI: Cahit BİLGİ

Eğitim-Öğretim:

2005–2010 Anadolu Üniversitesi, Uçak Gövde-Motor Bakımı Bölümü (Lisans)

2010–2013 Sakarya Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği (Lisans)

2012–2015 Karabük Üniversitesi, Makine Mühendisliği ABD (Yüksek Lisans).

İş Tecrübesi:

2008–2009 Türk Havacılık Uzay Sanayii, Stajer Mühendis

2009–2012 Türk Hava Yolları Teknik AŞ, Uçak Bakım Mühendisi

2012–2018 İstanbul Üniversitesi, Öğretim Görevlisi (D)

2018–... İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Öğretim Görevlisi (D)

İlgili Yayınlar

1. Effect of MWCNT on the properties of NCF-CFP hybrid composite fabricated via vacuum infusion (DOI: 10.1177/07316844231203044)
2. Formation of Aviation Epoxy Matrix Araldite LY5052 Solution With Graphene Nano Additive