

T.C.
ONDOKUZMAYIS ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**KARBON NANOTÜP KATKILI CAM ELYAF TAKVİYELİ KOMPOZİT
MALZEMELERİN MEKANİK DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**

Pınar ÇOLAK

YÜKSEK LİSANS TEZİ

T.C.
ONDOKUZMAYIS ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**KARBON NANOTÜP KATKILI CAM ELYAF TAKVİYELİ KOMPOZİT
MALZEMELERİN MEKANİK DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**

Pınar ÇOLAK

MALZEME BİLİMİ VE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

SAMSUN

2018

Her hakkı saklıdır.

ETİK BEYAN

Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez içindeki bütün bilgilerin doğru ve tam olduğunu, bilgilerin üretilmesi aşamasında bilimsel etiğe uygun davrandığımı, yararlandığım bütün kaynakları atıf yaparak belirttiğimi beyan ederim.

../../2018

....imza....

Pınar ÇOLAK

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

KARBON NANOTÜP KATKILI CAM ELYAF TAKVİYELİ KOMPOZİT MALZEMELERİN MEKANİK DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

Pınar ÇOLAK

Ondokuz Mayıs Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Özgür DEMİRCAN

Bu çalışmada, cam elyaf takviyeli kompozit malzemelerde karbon nanotüp (CNT) katkısının mekanik özelliklere etkisi araştırıldı. Karbon nanotüpler çoğul duvarlı (MWCNT) olup, saf (%0 MWCNT) ve ağırlıkça %0,2 MWCNT içeriğiyle, çift eksenli çözümlü örme kumaş özelliğine sahip cam fiber / epoksi reçine/CNT, cam fiber/epoksi reçine içeren termoset kompozit malzemeler, Reçine Transfer Kalıplama (RTM) yöntemi ile üretildi. Üretilen numuneler elyaf hacim oranını belirlemek üzere, yakma testine tabi tutuldu. Kompozit malzemelerin mekanik değerlerinin hangi faktörlerden etkilendiği, çekme ve eğme kırılma modları, taramalı elektron mikroskop (SEM) ve optik mikroskop görüntüleri inceleyerek, sonuç kısmında ayrıntılı bir şekilde ifade edildi. Bu çalışmayla reçine / elyaf ara yüzünün bağlanmasını geliştirerek ürettiğimiz nanokompozit malzemelerin çekme ve eğme özelliklerini arttırarak, yeni kullanım alanlarına ulaşmayı amaçladık.

Bu çalışmanın sonucunda, termoset kompozitlerde, 0° yönünde MWCNT içeren numunelerin, içermeyenlere göre çekme mukavemetinde %14 artışa sahip olduğu gözlemlenmiştir. Aynı zamanda, 90 ° yönündeki MWCNT içeren numunelerin en iyi eğme modülüne, mukavemetine sahip olduğu ve MWCNT içermeyen numunelere göre %97 ve %58 oranında eğme modülü ve mukavemet artışı gösterdiği sonucuna varıldı.

Haziran 2018, 50 sayfa

Anahtar Kelimeler: Cam elyaf, karbon nanotüp, epoksi, kompozit malzemeler, mekanik özellikler.

ABSTRACT

Master's Thesis

INVESTIGATION OF THE MECHANICAL BEHAVIORS OF CARBON NANOTUBE INTEGRATED GLASS FIBER REINFORCED COMPOSITE MATERIALS

Pınar ÇOLAK

Ondokuz Mayıs University

Graduate School of Sciences

Department of Material Science And Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr Özgür DEMİRCAN

In this study, The effect of carbon nanotube (CNT) addition on the mechanical properties of glass fiber reinforced composite materials was investigated. Carbon nanotubes have multiple walls (MWCNT), neat (%0 MWCNT) and %0,2 MWCNT glass fiber/epoxy resin and glass fiber/epoxy resin were used to fabricate the thermoset composites using by Resin Transfer Molding (RTM) method.

The produced samples were subjected to a burn-off test to determine the fiber volume ratio. The mechanical factors of the composite materials were influenced by factors, tensile and flexural fracture modes, Scanning Electron Microscope (SEM) and optical microscope images were examined and the results showed in detail. By this work, we aimed to improve the tensile and bending properties of the nanocomposite materials by the bonding of the resin / fiber interface and to reach new usage areas.

As a result of this study, it was observed that samples containing MWCNT in the direction of 0 ° in the thermoset composites had a higher tensile strength of 14% compared to those without MWCNT. At the same time, samples with MWCNT in the 90 ° direction were found to have the best bending modulus, strength, and 97% and 58% increase in flexural modulus and strength compared to samples without MWCNT.

June 2018, 50 pages

Key Words : Glass fiber, carbon nanotube, epoxy, mechanical properties, composite materials,

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Akademik eğitimimin en önemli adımı olan, yüksek lisans tez çalışmamda bilgi ve deneyimleriyle bana yol gösterici olan, değerli danışman hocam, Doç.Dr.Özgür DEMİRCAN'a teşekkür ederim.

Ayrıca, yüksek lisans eğitimim boyunca benden desteklerini esirgemeyen tüm arkadaşlarıma da teşekkür ederim.

Gösterdikleri anlayış, sabır ve destekten dolayı, kıymetli aileme, emeği, desteği, özveriyle her zaman yanımda duran, gurur kaynağım, rahmetli babam Mak.Müh.Hüsnü ÇOLAK'a teşekkürü ve minneti borç bilir, tüm çalışmalarımı ona ithaf ederim.

Bu tez çalışması, PYO. MUH.1904.16.004 proje numarasıyla, bilimsel araştırma projesi olarak Ondokuz Mayıs Üniversitesi tarafından desteklenmiştir. Bilimsel araştırma projeleri (BAP) birimine desteklerinden ötürü, teşekkür ederim.

Haziran 2018, Samsun

Pınar ÇOLAK

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT	ii
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	ix
BÖLÜM 1.....	1
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2.....	6
KOMPOZİT MALZEMELER.....	6
2.1.Tanım	6
2.2. Sınıflandırma	7
2.3. Kompozit Malzemelerin Avantaj ve Dezavantajları	8
2.4. Kompozit Malzemelerin Kullanım Alanları.....	9
BÖLÜM 3.....	10
POLİMER MATRİKS MALZEMELERİ.....	10
3.1.Tanım	10
BÖLÜM 4.....	13
CAM ELYAF TAKVİYE MALZEMESİ	13
4.1.Tanım	13
4.2. Cam Elyafın Özellikleri	13
BÖLÜM 5.....	15
KARBON NANOTÜP	15
5.1.Tanım	15
5.2.Karbon Nanotüp Çeşitleri	16
5.3.Karbon Nanotüp Çeşitleri (SWCNT ve MWCNT).....	17
5.5.Karbon Nanotüp Sentezleme Yöntemleri	19
BÖLÜM 6.....	23
KOMPOZİT MALZEME ÜRETİM YÖNTEMLERİ.....	23
6.1 Elyaf Sarma Yöntemi.....	23
6.2. Santrifüj(Savurma) Döküm Yöntemi.....	23
6.3.Vakum yardımcı reçine transferi yöntemi (VARTM)	24
6.4.RTM (Reçine Transfer Metodu).....	25
6.5.El Yatırması ve Püskürtme Yöntemi.....	25

6.6.Pultruzyon Yöntemi-Profil Çekme Yöntemi	26
BÖLÜM 7.....	27
MATERYAL VE YÖNTEM.....	27
7.1.Materyal	27
7.2. Yöntem	28
7.3.Yakma Testi.....	31
BÖLÜM 8.....	35
FİZİKSEL VE KİMYASAL KARAKTERİZASYON	36
8.1.Çekme Testi	36
8.2. Üç Nokta Eğme Testi	37
8.3.SEM Görüntüleri	38
BÖLÜM 9.....	39
BULGULAR VE TARTIŞMA	39
9.1. Bulgular ve Tartışma	39
BÖLÜM 10.....	43
SONUÇ VE ÖNERİLER.....	43
KAYNAKLAR	44
ÖZGEÇMİŞ.....	49
YAYINLAR	50

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

SİMGELER

AÇIKLAMALAR

Mm	Milimetre
Cm	Santimetre
M	Metre
μm	Uzunluk (mikrometre)
Å	Uzunluk (Angström)
Nm	Nanometre
M ²	Metre Kare
Gr	Gram
Dk	Dakika
Pa	Paskal
Mpa	Mega Paskal
TPa	Tera Paskal
W	Watt
°C	Santigrat
°F	Fahrenayt

KISALTMALAR

AÇIKLAMALAR

CNT	Karbon nanotüp
SWCNT	Tek duvarlı karbon nanotüp
MWCNT	Çok duvarlı karbon nanotüp
VARTM	Vakum infüzyon yöntemi
RTM	Reçine transfer kalıplama
AFM	Atomik kuvvet mikroskopi
DMA	Dinamik mekanik analiz
PMK	Polimer matriksli kompozit
CTP	Cam elyaf takviyeli kompozit
PLC	Programlanabilir Mantık Denetleyici
PVD	Fiziksel buhar biriktirme

CVD	kimyasal buhar biriktirme
0 D	Sıfır boyutlu
1 D	Bir boyutlu
2 D	İki boyutlu
Y	Young Modülü
ϵ	Uzama
σ	Gerilme
V	Hacim



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil No	Sayfa No
ŞEKİL 1. KOMPOZİT MALZEMEYİ OLUŞTURAN FAZLARIN ŞEMATİK GÖSTERİMİ	6
ŞEKİL 2.TAKVİYE ELEMANLARININ ŞEKLİNE GÖRE SINIFLANDIRMA.....	7
ŞEKİL 3. MATRİKS MALZEMESİNE GÖRE SINIFLANDIRMASI.....	8
ŞEKİL 5. GRAFİT VE GRAFEN YAPISI	15
ŞEKİL 6. KARBON NANOTÜP YAPISI.	16
ŞEKİL 7. NANO YAPILARIN MAKROSKOBİK BOYUTLARA GÖRE SINIFLANDIRILMASI.....	16
ŞEKİL 8. KARBON NANOTÜP ÇEŞİTLERİ	17
ŞEKİL 9. KOLTUK, KİRAL, ZİGZAG YAPILARININ GÖSTERİMİ	18
ŞEKİL 10.KARBON NANOTÜP YAPILARI	18
ŞEKİL 11. ARK DEŞARJ YÖNTEMİNİN ŞEMATİK GÖSTERİMİ	20
ŞEKİL 12. CVD PROSESİ	21
ŞEKİL 13. LAZER ABLASYON İŞLEMİNİN ŞEMATİK GÖSTERİMİ	21
ŞEKİL 14. ÇİFT TARAFLI/SÜREKSİZ ELYAF SARMA PROSESİ	23
ŞEKİL 15. SANTRİFÜJ KALIPLAMA YÖNTEMİ.....	24
ŞEKİL 16. VARTM SİSTEMİNİN UYGULANMASI	24
ŞEKİL 17. RTM CİHAZI	25
ŞEKİL 18. EL YATIRMASI YÖNTEMİ	25
ŞEKİL 19. PULTRUZYON KALIPLAMA YÖNTEMİ	26
ŞEKİL 20. CNT DAĞITMA AŞAMALARI	28
ŞEKİL 21.SPREYLEME ALANINDA CAM KUMAŞ.....	29
ŞEKİL 22. 4 KAT 0,% 2 CNT ENTEGRE EDİLMİŞ KUMAŞ.....	30
ŞEKİL 23. RTM PROSES ŞEMASI	30
ŞEKİL 24. 4 KAT İSTİFLENMİŞ CAM ELYAFIN ŞEMATİK GÖSTERİMİ	31
ŞEKİL 25.YAKMA NUMUNELERİ.....	32
ŞEKİL 26. INSTRON 5982 ÜNİVERSAL TEST MAKİNESİ	36
ŞEKİL 27. ÇEKME TESTİ TEST CİHAZI VE NUMUNE POZİSYONU.....	37
ŞEKİL 28. ÜÇ NOKTA EĞME DENEYİ DÜZENEGİ.....	37
ŞEKİL 30. ÇEKME NUMUNELERİ	39
ŞEKİL 31. ÇEKME TESTİ SONUÇLARININ GRAFİKSEL İFADESİ	39
ŞEKİL 32. EĞME TESTİ SONUÇLARI GRAFİKSEL İFADESİ.....	40
ŞEKİL 33. %0,2 CNT İÇEREN CAM ELYAFIN GÖRÜNTÜSÜ (20.000X BÜYÜTME)	41
ŞEKİL 34. %0,2 CNT İÇEREN CAM ELYAFIN SEM GÖRÜNTÜLERİ (50.000X BÜYÜTME)	41
ŞEKİL.35. SAF (%0 CNT) KOMPOZİT NUMUNENİN OPTİK MİKROSKOP GÖRÜNTÜSÜ	42
ŞEKİL.36. %0,2 CNT KATKILI KOMPOZİT NUMUNENİN OPTİK MİKROSKOP GÖRÜNTÜSÜ	42

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge No	Sayfa No
ÇİZELGE 1. KOMPOZİT MALZEMELERİN AVANTAJ VE DEZAVANTAJLARI	8
ÇİZELGE 2. KOMPOZİT MALZEMELERİN KULLANIM ALANLARI	9
ÇİZELGE 3. TERMOSET VE TERMOPLASTİK MALZEMELERİN ÖZELLİKLERİ	11
ÇİZELGE 4. EPOKSİ REÇİNELERİN ÖZELLİKLERİ	11
ÇİZELGE 5. CAM ELYAF ÇEŞİTLERİ	13
ÇİZELGE 6. CAM ELYAFIN TÜRLERİNE GÖRE MEKANİK ÖZELLİKLERİ	14
ÇİZELGE 7. CNT SENTEZLEME YÖNTEMLERİNİN AVANTAJ VE DEZAVANTAJLARI	22
ÇİZELGE 8. MWCNT'LERİN FİZİKSEL VE KİMYASAL ÖZELLİKLERİ	27
ÇİZELGE 9. ÇİFT EKSENLİ ÇÖZGÜLÜ ÖRME KUMAŞIN VERİLERİ.....	28
ÇİZELGE 10. ELYAF YÜZEYİNE PÜSKÜRTMEDE UYGULANAN BİLEŞENLER VE ORANLARI.....	29
ÇİZELGE.11. ÜRETİLEN KOMPOZİT PLAKALARIN EPOKSİ VE SERTLEŞTİRİCİ ORANLARI.....	31
ÇİZELGE 12. KOMPOZİTLERİN ELYAF HACİM ORANLARI	34
ÇİZELGE 13. ATKI,ÇÖZGÜ,ÖRGÜ İPLİĞİ HACİM ORANLARI	34
ÇİZELGE 14. KOMPOZİTLERDEKİ BOŞLUK HACİM ORANI.....	35

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Kompozit malzemelerin, üretim kolaylıkları, çeşitliliği, estetik görünüm sağlamaları ve en önemlisi nano yapılarla olan uyumlarıyla birlikte, araştırmacıların ilgi odağı olmuştur. Bu durum, nano malzeme içerikli kompozitlerin ortaya çıkışını hızlandırmıştır. Nano kelimesi, Yunanca “*nannos*” kelimesinden gelir ve “*küçük veya cüce*” kelimesini ifade eder (Wang vd, 2007). Günümüzde nano terimi, teknik bir ölçü birimi olarak kullanılır. Ayrıca, bir nanometrenin değeri, metrenin milyarda biri ölçüsünde, uzunluğu ifade eder ($10^{-9}m$).

Hibrit malzeme üretiminde, nano ve plastik malzeme uyumu ile üretilen kompozit malzemelerden elde edilen araştırmalar sonucunda, ileri derecede mukavemetinde artış, hafiflik ve düşük maliyet ile beraber estetik görünüm elde edilmiştir. Dolayısıyla bu uyum hibrit malzeme imalatına da öncü olmuştur. Hem termoplastik hem de termoset kompozit malzemelerin endüstride kullanılması, özellikle metalik malzemelerle olan uyumları nedeniyle önemli ölçüde tercih edilirler. Vasić vd, (2018) çalışmalarında kompozit malzemelerin, metallere göre temel özelliklerini ve farklılıklarını incelemiş ve İnsansız Hava Aracı (İHA) gelişiminde uygulanan kompozit entegre tasarım üzerine çalışma yapmışlardır.

Termoplastik kompozitlerin temel dezavantajlarından birisi düşük erime sıcaklığıdır. Zincirleri içinde birincil (direkt bağlı) kovalent, zincirler arası ise ikincil (etkileşerek) van der waals bağlarına sahiptir. Termoplastikler, sekonder bağlar ve zincirler tarafından birbirine tutturulan uzun hidrokarbon moleküllerinden oluşurlar ve ikincil bağların (Van Der Waals), birincil (kovalent) bağlardan daha zayıf olup dolayısıyla bir termoplastığın sıcaklığını arttırarak kolaylıkla eritilebilirler (Sheikh-Ahmad vd, 2009). Termoplastik malzemeler geri dönüştürülebilir ve hafiftirler. Termoset malzemeler ise geri dönüştürülemezler. Termoset monomerler, genellikle düşük viskozite sergilerler bu durum, son kullanıcının, termosetin performansını optimize eden, katkı maddeleri ve takviye edici malzemeleri kullanmasını kolaylaştırır. Termoset matriks, cam elyaf kumaşı iyi ıslatma özelliğindedir ve matriks malzemesi olarak epoksi matriks fazlaca tercih edilir. Ayrıca, cam elyaf dokuma çeşidine göre mekanik özellikler farklılıklar gösterir. Örme kumaşların

kullanımı, hem daha kolay hem de daha ucuz bir şekilde üretilebilen yüksek kaliteli kompozitler nedeniyle büyük ölçüde artmıştır. Demircan vd (2015) çalışmalarında, çeşitli örgü tekniklerinin çift eksenli atkı örme (BWK) termoplastik kompozitlerin mekanik özellikleri üzerindeki etkisini üzerine çalışma yapmış ve BWK kompozitlerinin gerilme ve üç nokta eğilme etkisi gibi mekanik özelliklerini, örme tekniklerini değiştirerek iyileştirilebileceğini ifade etmişlerdir.

İnsan saç teli çapının yaklaşık 100.000 nm olduğu düşünülürse, nano boyuttan bahsederken ne kadar küçük bir ölçekten bahsedildiği rahatça anlaşılabilir. Karbon nanotüpler, nano ölçekte yapılardır. Küçük yapıları, bünyesinde birçok mükemmel özelliği barındırır. Yapılan birçok çalışma, CNT eklentisinin malzemenin mukavemetini arttırdığını ortaya koymuştur. Xie vd, (2000) çalışmalarında, CNT'lerin fiber kompozit sisteme entegrasyonunun fiber matris yük aktarımını arttırdığını bildirmişlerdir.

Ayrıca, kompozit interfazın, bir kompozitin mekanik özelliklerini kontrol ettiği iyi bilinmektedir. Karbon formu olan CNT'ler, yüksek gerilme mukavemeti, young modülü, yüksek termal iletkenlik ve yüksek akım yoğunluğu gibi olağanüstü fiziksel ve mekanik özelliklere sahip, benzersiz nanoyapılı malzemelerdir (Mintmire, 1995; Jonathan, 2006; Treacy,1996; Yu,2000). Bununla beraber, MWCNTs katkısı sadece epoksi matriksin gerilme mukavemetini arttırmakla kalmaz aynı zamanda kırılma tokluğunda arttırır (Guo vd,2007). Bu mükemmel özellikler, polimer malzemelerin elektriksel, termal iletimini, mekanik özelliklerini arttırmak amacıyla polimer kompozit sistemlerde dolgu maddesi olarak CNT'lerin kullanılmasına ilgi çekmektedir (Frank vd,1998).

Ne yazık ki, nano boyuttaki tüplerden dolayı polimerik malzemelerde, CNT'yi dağıtmak zordur, birbirine dolanmış tüpler arasında Van Der Waals etkileşiminin neden olduğu dolaşmalar görülür. Ayrıca, bir MWCNT'nin iç katmanlarının, sadece Van der Waals etkileşimleri yoluyla değil, çekme veya kesme kuvvetlerinin doğrudan uygulanması yoluyla da etkili bir şekilde, deforme olabildiği gösterilmiştir (Li ve Chou, 2003). CNTs aglomerasyonunun varlığı, homojen CNTs dispersiyonunun oluşumunu engeller, dolayısıyla kompozitlerin performansını etkiler. CNT' nin polimerde etkin kullanımı, matris reçinesindeki tüplerin homojen dağılımına ve tüp duvarıyla polimer matris arasındaki ara yüzeylere yapışmasına bağlıdır. Ulcay vd, (2002), çalışmalarında “Arabirimdeki bağın ya da yapışmanın

yüksek olması, kompozitin mukavim ancak katı, zayıf olması, kompozitin mukavemet ve katılık yönünden zayıf olduğunu gösterir.” şeklinde ifade etmişlerdir.

Kompozit malzeme üretiminde birçok teknik mevcuttur. Bu çalışmada, kompozit paneller, RTM yöntemiyle üretilmiştir. RTM, sıcaklık ve vakum altında matriks malzemesinin elyaf takviyeye nüfuz etme işlemidir. Aynı zamanda, Sözer vd, (2012) RTM sisteminden bahsederken, “sürekli lifler kullanılarak düşük viskoziteli termoset reçinelerle yüksek hacimli, düzgün şekilli, yapısal parçaların üretimi için kompozit imalatında reçine transfer kalıplama (RTM) işlemi benimsenmiştir”. Şeklinde ifade etmişlerdir. Bu konuda yapılan literatür araştırmaları aşağıda özetlenmiştir.

Al-Saleh vd (2017), Karbon Elyaf / CNT takviyeli Epoksi Kompozitlerin Vakum torbalama Prosesiyle mekanik özelliklerini artırmayı hedeflemişler ve farklı karbon nanotüp konsantrasyonların da tek yönlü karbon elyaf / epoksi kompozit laminatlar, VARTM prosesi ile imal edilmiştir. Deneysel sonuçlar, karbon nanotüp eklenmiş epoksi / karbon fiber kompozitin saf epoksi / karbon fiber kompozit ile karşılaştırıldığında young modülü’nde %20 iyileştirme gösterdiğini tespit etmişlerdir. Apohan vd (2018), aminle bağlanmış çok duvarlı karbon nanotüpler (MWCNT) ile kompozit poliimid filmlerin hazırlanması amaçlanmıştır. Kompozit poliimid filmlerin termal kararlılığı, imidizasyon tepkimesinin bir sonucu olarak poliimid esaslı matris ile modifiye edilmiş karbon nanotüp arasındaki kovalent etkileşime bağlı olarak modifiye edilmiş karbon nanotüp ilavesi ile arttırılmıştır. MWCNT ilavesi BTDA-ODA-6% MWCNT polimid filminin Tg'sini BTDA-ODA poliimid filmine göre 275 ° C'den 304 ° C'ye yükseltmiştir. Buna ek olarak, filmlerin mekanik özellikleri geliştirildiğini tespit etmişlerdir. Tüzemen vd (2017), Karbon nanotüp, nano kil ve hibrid (CNT+Nano kil) eklenmesiyle cıvatalı, karbon / epoksi nanokompozitlerin mekanik özelliklerinin geliştirilmesi üzerine araştırma yapmışlardır. Nano kil, CNT, hibrit kompozitlerden alınan örneklerde yatak mukavemetinde %5,2, %3,9 ve %0,8 artış sağladılar. Aynı zamanda, Nano kil, CNT, hibrit kompozitlerin eklenmesinin çekme dayanımında %47,7 %57,1 artış olduğunu gözlemlediler. Bingöl ve Çavdar (2016), farklı fiber takviyeli malzemelerin kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinin iyileştirilmesine etkisi hakkında çalışma yapmışlar ve mukavemeti artırmak için rastgele fiberler ve dokuma fiber kullanarak mekanik sonuçları incelemişlerdir. Rastgele cam elyaflarda bu değer 67,58 MPa iken

dokuma elyaflarda 137,29 MPa bulmuşlardır. Sonuç olarak, dokuma cam elyafları diğerlerine göre iki kat daha fazla çekme dayanımına sahip olduğu sonucuna varmışlardır. Zanjani vd (2016), Hibrit kompozitlerin epoksi matrisli, karbon fiber/grafen seçimine bağlı olarak üç farklı üretim ile, mekanik özelliklerini araştırdılar. Düzlem içi ve düzlem dışı mekanik özelliklerde artış görülmüştür. Kırılma mukavemetinde %55 ve eğme mukavemetinde yaklaşık %51 oranında artış elde ettiler. M. Mariatti vd, (2015) Çok duvarlı karbon nanotüp katkılı epoksi kompozitlerin, MWCNT eklentisinin, döküm ve presleme teknikleriyle üretilmiş kompozitlerin mekanik, elektriksel ve ısı özelliklerine etkilerini araştırmışlardır. Ağırlıkça %0 ile %1,0 aralığındaki MWCNT kullanarak döküm yöntemiyle üretilen kompozitlerde, saf epoksiye kıyasla MWCNT / epoksi kompozitlerinin gerilme mukavemetini ve çekme modülünü azalttığını, bununla birlikte, sıcak presleme tekniği ile hazırlanan MWCNT / epoksi kompozitleri, morfolojik analizle teyit edildiği üzere, ağırlıkça %0,4 MWCNT yüklemesinde gerilme mukavemetini ve gerilme modülünü arttırdığı sonucuna varmışlardır. Kim vd (2013), karbon nanotüp katkılı, karbon fiber takviyeli epoksi kompozitlerinin kesme ve burulma özellikleri üzerine araştırma yapmışlar ve %0,5 CNT'li kompozitlerin katlar arası kesme dayanımını, saf CFRP kompozitlerine kıyasla %12 oranında artarken, boru örnekleri kullanılarak burulma kesme modülü ve mukavemeti sırasıyla %17 ve %19,5'lik iyileştirme gösterdiğini bulmuşlardır. Böger vd (2010), cam elyaf takviyeli epoksi içerisinde nanopartiküllerin katılmasıyla yorulma ömrünün iyileştirilmesi üzerine araştırma yapmışlar ve ağırlıkça %0,3 silika ve çok duvarlı karbon nanotüpler (MWCNT) ile üretilen cam elyaf takviyeli epoksi laminatların yorulma özellikleri, statik ve dinamik yorulma testleri ile değerlendirilmişlerdir. Katkılı MWCNT matrisi için, elektriksel iletkenlik durumu ölçülmüş ve nanopartiküllerin eklenmesiyle, %16'ya kadar olan ara fiber kırılma mukavemetinde artışa neden olduğu sonucuna varmışlardır. Gorbatikh vd (2010), karbon nanotüplerle modifiye edilen kompozitlerde cam elyaf / epoksi ara yüzey kesme dayanımını incelemişlerdir. Fiberin CNT ile kaplandığı numunelerde %90'ın üzerinde ara yüzey kesme kuvveti elde ettiler. Wang vd (2008), çok duvarlı karbon nanotüpler içeren poliamid bazlı nanokompozitlerin özellikleri konusunda araştırma yapmışlardır. Araştırma sonucunda, Young modülünü, gerilme mukavemetini ve uzamasını içeren mekanik özelliklerin, CNT içeriği ağırlıkça %0.01-0,5 arasında iken arttırdığı, DMA ölçümleriyle ise, camsı geçiş sıcaklığında (T_g) CNT içeriğinin artmasıyla arttığını

açıkça göstermiştir. Zhihang Fan vd (2007), yaptıkları çalışmada çok duvarlı karbon nanotüplü cam elyaf takviyeli epoksi kompozitlerin katlar arası kesme dayanımını iyileştirmeye çalışmışlardır. Bu araştırma sonucunda, katlar arası kesme dayanımının %33 oranında arttığı sonucuna ulaşmışlardır. Chou ve Li (2003), çok duvarlı karbon nanotüplerin elastik modüllerine Van der Waals kuvvetlerinin etkisi üzerine araştırmalar yapmışlar ve sonuçlar tüp çapı, tüp tipi ve tüp katmanlarının sayısının MWCNT'lerin elastik özellikleri üzerinde bazı etkilere sahip olduğunu göstermektedir. Ayrıca, bir MWCNT'nin iç katmanlarının, sadece Van der Waals etkileşimleri yoluyla değil, çekme veya kesme kuvvetlerinin doğrudan uygulanması yoluyla da deforme olabileceği sonucuna ulaşmışlardır. Thostenson ve Chou (2002), sıralı dizilmiş çok duvarlı karbon nanotüp takviyeli kompozitlerin, işleme ve mekanik karakterizasyonları konusunda çalışma yapmışlar ve polistren matriks içine %5 oranında MWCNT ekleyerek hem sıralı hem de rastgele dizilime sahip nano kompozit malzeme üretmişlerdir. Nanotüplerin ilavesinin, polimer filmlerin çekme modülüsünü, akma mukavemetini ve nihai dayanımlarını arttırdığını, sıralı nanotüp kompozitlerle elastik modülüsünün gelişimini incelediklerinde ise, rastgele yönlendirilmiş kompozitlere göre hizzalı kompozitlerin elastik modülüsünün beş kat daha fazla olduğu sonucuna ulaşmışlardır.

Literatürde, kompozit malzemelerin mekanik özellikleri, matriks ve takviye elemanın etkisi üzerine birçok çalışma mevcuttur. Ayrıca, fiberleri CNT ile kaplayarak, ara yüzey ve mekanik özelliklerini geliştirmeye yönelik bazı çalışmalar bulunmaktadır. Ancak, bizim çalışmamızla aynı doğrultuda, nano malzeme (MWCNTs) ile kumaş kaplanarak aynı zamanda, RTM (reçine transfer kalıplama) yöntemiyle üretilmiş termoset kompozitlerin, mekanik özellikleri hakkında hiçbir araştırma bulunamamıştır. Bu çalışmada, nano malzemeyle kumaşları kaplayarak, arayüzey, elyaf hacim oranı, elyaf doğrultusu incelenmiş olup, kompozit malzemelerin mekanik özellikleri üzerine etkilerinin araştırılması için mekanik testlerle analiz edilerek, SEM ve optik mikroskopuyla görüntülenmiştir.

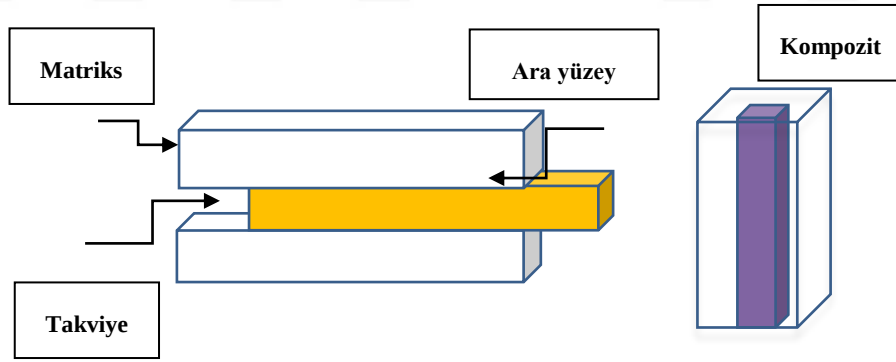
BÖLÜM 2

KOMPOZİT MALZEMELER

2.1.Tanım

Birbirine karışmayan iki veya daha fazla katının bileşimiyle oluşan katı malzemelere "*kompozit malzeme*" denir. Doğadaki malzemelerin çoğu "kompozit" olarak adlandırılan bileşik yapıli maddelerden oluşur. Bu karışımın özelliği, kendini oluşturan maddelerin özelliklerinden çok daha üstündür. Bu malzemeler yüksek mukavemet (çekme ve basma mukavemeti), yüksek elastik modülü ve yüksek tokluğa sahiptirler (Onat, 2015).

Bir diğer tanım ile kompozit malzemeler, bileşenlerin makro düzeyde birleşmesiyle oluşan malzemeler olarak ifade edilirler (Onaran, 2003). Kompozit malzemeler, bir takviye bir de matris fazından ileri gelirler. Takviye fazı malzemeye gelen yükü taşır, dayanım, termal kararlılık, takviyenin cinsine göre de elektrik iletkenliğini, yalıtkanlığı sağlar. Matriksin dayanım, rijitlik gibi özellikleri belirler. Matris fazı, bağlayıcılık özelliği kazandırır, takviye fazını bir arada tutar. Ara yüzey ise matris ve takviye fazının arasındaki fazdır.



Şekil 1. Kompozit malzemeyi oluşturan fazların şematik gösterimi

Kompozit malzemeler, neredeyse metaller kadar dayanıklı ve sert olmalarının yanında çokta hafiftirler (Onat,2015). Ayrıca, yapışmaları, ara yüzeyle ilişkilidir. Zum (1987), araştırmalarında “plastik matrisli ve elyaf takviyeli kompozitlerin sürtünme ve aşınma özelliklerinin, büyük ölçüde kompoziti oluşturan bileşenlerin, takviye malzeme çeşidi, takviye elemanının yapı içerisindeki dağılımı, elyaf hacim oranı, elyaf kalınlığı ve şekli, doğrultuları gibi özelliklerine ve arayüzey özelliklerine bağlıdır” şeklinde ifade etmiştir.

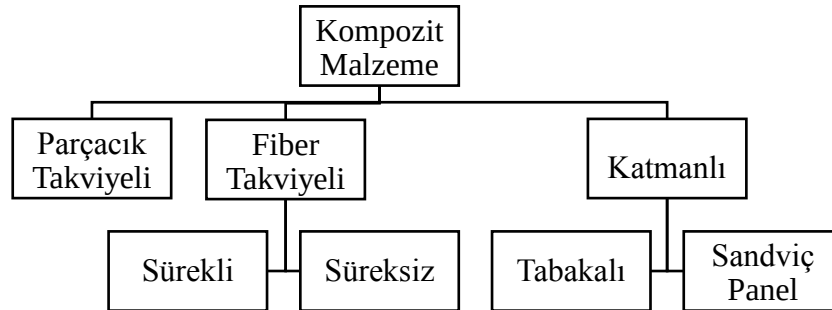
2.2. Sınıflandırma

Kompozit malzemeler, takviye ve matriks fazlarından oluşurlar. Bu durumda, kompozit malzemeler kendisini meydana getiren bileşenlerin çeşidine göre sınıflandırılırlar.

2.2.1. Takviye elemanlarının şekline göre sınıflandırma

Takviye seçimini, malzemenin mekanik özelliklerini doğrudan etkiler. Şahin (2006), “Kompozit malzemede takviye elemanının asıl görevi; yükü taşıyarak matiksin rijitliğini ve dayanımını arttırmaktır.” şeklinde ifade etmiştir.

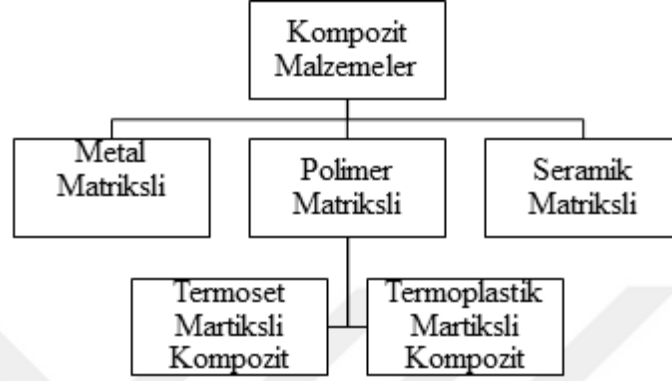
Takviye fazına gelen yükün homojen dağılması, fazların ara yüzey bağının iyi olmasıyla mümkündür. Kompozit malzemele üretiminde genellikle cam elyafı tercih edilir. Kompozit malzemelerde fiziksel ve mekanik özellikleri belirleyen en temel faktörler, takviye seçimi, üretim tekniği, elyafların ıslanabilirliği ve elyaf içeriğidir (Sankar,2011). Takviye malzemelerine göre kompozit malzemeler, beş ana ve dört alt başlık altında açıklanmıştır.



Şekil 2.Takviye elemanlarının şekline göre sınıflandırma

2.2.2. Matriks malzemesine göre sınıflandırma

Matriks malzemesi, kompozitin yapısal bütünlüğü oluşturması için takviye malzemesini bir arada tutar, yükün elyaf arasında dağılmasını ve elyafın kimyasal etkilerden ve atmosfer şartlarından korunmasını sağlar. İçeriklerine göre dayanımları da Matriks malzemeleri, genel haliyle şekilde verilmiştir.



Şekil 3. Matriks malzemesine göre sınıflandırması

2.3. Kompozit Malzemelerin Avantaj ve Dezavantajları

Çizelge 1. Kompozit malzemelerin avantaj ve dezavantajları (Onat,2015)

Avantajlar	Dezavantajlar
Yüksek mukavemet	Hammaddenin pahalı olması
Kolay şekillendirme	Sınırlı raf ömrü
Elektriksel özellikler	Gevrek olmaları
Isıya ve ateşe dayanıklılık	
Titreşim Sönümlleme	
Korozyona dayanıklılık	
Kalıcı renklendirme	
Kimyasal etkilere karşı dayanıklılık	

2.4. Kompozit Malzemelerin Kullanım Alanları

Kompozit malzemeler, hafiflik, rijitlik ve dayanım özelliklerinin bir arada arandığı yerlerde sıklıkla tercih edilirler. Sektörlere göre kullanım alanları çizelge 2’de sunulmuştur.

Çizelge 2. Kompozit malzemelerin kullanım alanları

kullanım alanları
Havacılık ve savunma sanayi
Deniz taşımacılığı
Kara taşımacılığı
Uzay sistemleri
Enerji
Yapı/inşaat
Spor ürünleri
Ev ürünleri

BÖLÜM 3

POLİMER MATRİKS MALZEMELERİ

3.1.Tanım

Plastiklerin ana maddesi, organik polimerler oluşur. Bunlar genellikle büyük molekülü organik bileşiklerdir. Bu elementlerin (monomerler) çeşitli yöntemlerle tepkimeye girmesiyle makro molekül (polimer) adını taşıyan çok büyük ve karmaşık moleküller meydana gelir ve böylece polimerler meydana gelir (Yalçın,2002). Düşük maliyetli ve yüksek mukavemetli olmaları ile fazlaca tercih edilirler. Ayrıca, polimer matrisli malzemeler, bileşenlerine göre farklı özelliklere sahiptirler.

3.1.1. Termoplastik malzemeler

Termoplastik malzemeler, özelliklerinde önemli değişiklik olmadan ısıtılarak yeni şekillere sokulabilir ve bu işlem sırasında yapılarında hiçbir kimyasal değişiklik olmaz. Termoplastikler, yüksek sıcaklık ve basınç altında şekillendirilebilir. Şekillendirilirken yumuşaktır. Sonrasında sonra sertleşirler. Molekülleri çapraz bağlanmazlar, doğrusaldır.

3.1.2. Termoset malzemeler

Termoset plastikler, ısıtılarak ve istenen bir şekle getirilerek yumuşatılabilen, soğutmadan sonra sertlik kazandıran balmumu benzeri bileşiklerdir (Nicholas ve Cheremisinoff, 1995). Termoset malzemeler, termoplastikler gibi ısıtıldıklarında yapılarında kimyasal değişme meydana gelir. Bu yüzden tekrar eski şekillerini almazlar. Genelde kompozit malzeme üretiminde en çok kullanılan matris malzemesidir. Yapışma özelliğinin iyi olması ve kimyasallara karşı dirençli olması kullanım alanını arttırmaktadır. Termosetler, kovalent bağlar ile bağlanmıştır. Bu fark, termosetler ile termoplastikleri birbirinden ayıran en önemli farklılıktır. Bu yüzden termosetler, termoplastiklere göre daha rijit, mukavim ve düşük sünek davranış sergilerler (Sheikh-Ahmad, 2009).

Çizelge 3.Termoset ve termoplastik malzemelerin özelliklerinin karşılaştırılması

Termoset	Termoplastikler
Tekrar işlenemezler	Yeniden işlenebilirlik
Isıyla ayrışmazlar	Isı ile bir kez şekil verildikten sonra tekrar ısıtıldıklarında bozulurlar
Düşük çözücü direnci	Mükemmel çözücü direnci
Uzun kür süresi	Kısa kür süresi
Sert ve kırılgan	Isıtılınca yumuşar
İyi kimyasal dayanım	Düşük kimyasal dayanım
Geri dönüştürülemez	Geri dönüştürülebilir

Üretim şekli ve mol kütlesine bağlı olarak epoksi reçineler, sıvı veya katı polimer halinde elde edilirler. Polimerik kompozit malzeme üretiminde, genellikle epoksi reçineler tercih edilirler. Epoksi Reçineler, termoset polimer sınıfında yer alan yüksek yapıştırma gücüne sahip plastik malzemelerdir. Matris fazı olarak fazlaca tercih edilirler. Epoksi reçineler, düşük viskoziteli reçineler olup çoğunlukla oda sıcaklığında ve basınçta kalıplanabilir ve yan ürün oluşumu sağlamaz. Düşük basınçlarda kullanılabilen reçineler, çoğunlukla cam elyaf takviyeli plastik (FRP) kalıplama için tercih edilir (Nicholas ve Cheremisinoff, 1995).

Epoksi matriks, göstermiş olduğu yüksek adezyon, geniş sıcaklık aralıklarında çabuk sertleşebilme, uygulandıklarından kısa bir süre sonra kullanılması gibi birçok avantajlara sahiptirler. Diğer reçinelere göre çoğu kimyasala karşı dayanıklıdır. Nem'e, korozyona karşı dayanıklıdır. Mekanik özellikleri yüksektir. Epoksi reçinelerin kürlenmesinde büzülme eğilimleri azdır bundan dolayı iç gerilme oluşumu minimize edilir (Biron, 2004).

Çizelge 4. Epoksi reçinelerin özellikleri

Avantajları	Dezavantajları
Aşınmaya karşı dirençli	Ultraviyole ışınlarına karşı düşük dirençli
Darbeye karşı iyi dirençli	Maliyeti yüksek
Sıkışmaya karşı dirençli	
Kimyasal etkilere karşı dirençli	



BÖLÜM 4

CAM ELYAF TAKVİYE MALZEMESİ

4.1.Tanım

Cam elyafı, Silis kumu(SiO_2), sodyum, magnezyum, alüminyum, kalsiyum, bor ve demir karışımından elde edilir. Cam elyaflar, yaygın kullanıma sahiptir. Cam elyafların birçok çeşidi mevcuttur. Polimer matriksli kompozit malzeme üretiminde en çok kullanılanları, E-camıdır. E-camı yüksek çekme dayanımına sahiptir.

Çizelge 5. Cam elyaf çeşitleri (Gächter, 1987)

Cam Türü	İçerik
A	Alkali içerir
E	Alüminyum boron silikat camıdır, alkali içermez (<2%)
S	Gerilme mukavemeti yüksek, kati cam elyaf türüdür.
T	Kimyasallara dayanıklı cam elyaf türüdür.
C	C cam elyafının kuzey amerika varyantıdır.
AR	Alkali resistanttir, yani alkali dayanımlıdır.
E-CR	E-cr boron içermez. aside karşı yüksek korozyon direncine sahiptir. Mekanik özellikleri ise E-camıyla benzerdir.
D	Yüksek silika ve boron içerir, dielektrik uygulamalarında kullanılır, radyo frekanslarını geçirir.
R,S-2	Mekanik özellikleri e-camından daha iyidir. Maliyeti yüksek Olduğu için sadece özel uygulamalarda kullanılır.

4.2. Cam Elyafın Özellikleri

Cam elyafı, oldukça sağlam, çekme ve gerilmeye dayanıklı bir ipliktir. Bununla birlikte, küçük çaplı olmalarına rağmen hacmine göre çok geniş bir yüzey oluştururlar. Elyaflar da aranan en temel özellikler;

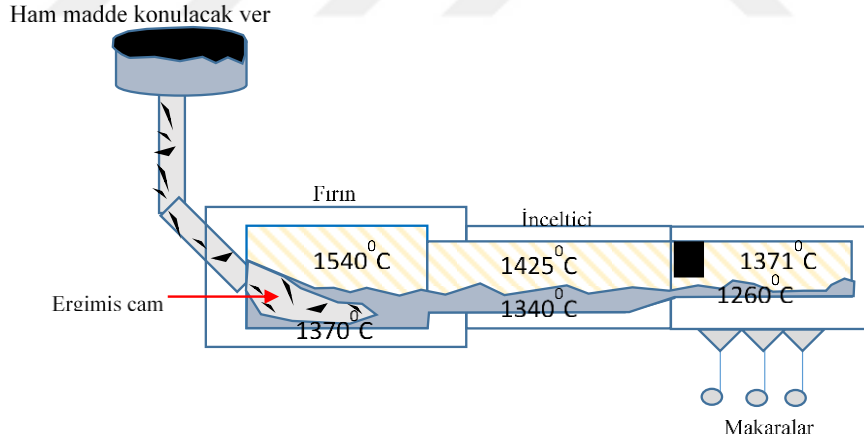
- Yüksek elastik modülü
- Yüksek mukavemet
- Düşük yoğunluk
- Kimyasal uyum
- Üretim kolaylığı
- Isıl dayanım

Çizelge 6. Cam elyafın türlerine göre mekanik özellikleri (Ersoy,2001).

Özellikler	E-Camı	A-Camı	M-Camı	S-Camı	C-Camı	D-Camı	R-Camı
Özgöl ağırlık (gr/cm ³)	2,54	2,45	2,89	2,49	2,45	2,16	2,58
Çekme dayanımı (Mpa)	3600	3100	3500	4500	3400	2450	4400
Kopma uzaması oranı (%)	4,8	—	—	5,4	4,8	—	—
Çekme E-Modülü (Gpa)	76	72	11,3	86	70	53	85
Kırılma indisi	1,548	1,512	1,635	1,523	—	1,47	—
Isıl genleşme katsayısı (cm/cm ⁰ K)	1,6x10 ⁻⁶	—	—	1,7x10 ⁻⁶	2,2x10 ⁻⁶	3,1x10 ⁻⁶	—
Lif çapı (mm)	3-20x10 ⁻³	—	—	3-13x10 ⁻³	—	—	—

4.3.Cam Elyaf Üretim Yöntemi

Cam elyaflar, camların elektrikli fırınında (1200⁰C -1500⁰C) ergitilen camların özel delikli bir potadan çekilerek, soğutma bölgesinden geçmesi sonucu makaralara sarılmasıyla elde edilir (Şahin, 2006).



Şekil 4. Cam elyaf üretim prosesi

BÖLÜM 5

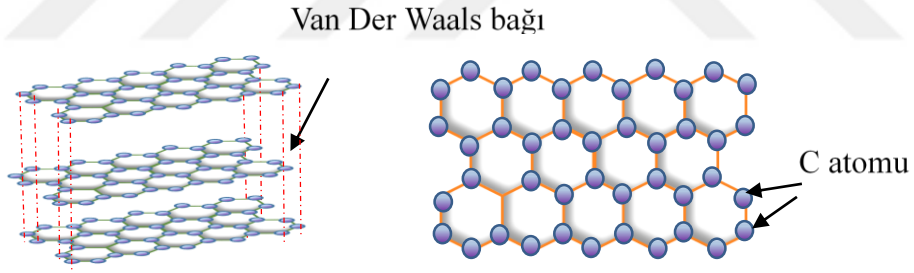
KARBON NANOTÜP

5.1.Tanım

Bir karbon atomu, çeşitli tipte allotroplar oluşturabilir. 3D yapılarda karbonun allotropları elmas ve grafittir. Karbon atomunun bu formları, çeşitli fiziksel, kimyasal ve biyolojik özellikler sunar. Ayrıca, karbon nanotüp (CNT), ilk olarak Sumio Iijima, (1991) tarafından Tsukuba'daki laboratuvarında sentezlenen bir karbon fazıdır.

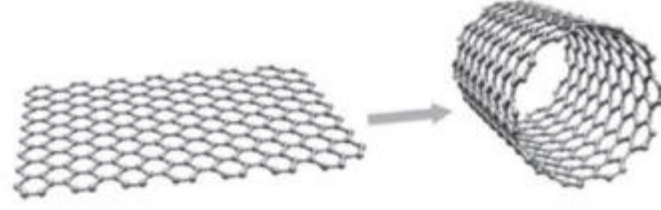
Karbon nanotüpler, silindirik hale getirilmiş grafen levhalardan oluşan bal peteği görünümüne sahip fulleren denilen yapıdan oluşurlar. Bir başka deyişle, hegzagonal yapıdaki karbon atomlarından oluşurlar. Grafit, grafen düzlemlerinin bir araya gelmesiyle oluşur. Aynı zamanda, sp^2 bağı yapar. Ayrıca, grafit tabakalarının arasında Van der Waals bağları bulunur.

Nanoteknolojinin de yakından ilgilendiği karbon nanotüpler küçük yapılarına rağmen, yüksek mekanik özellikleri, termal kararlılıkları, elektriksel özellikleri ve aynı zamanda hafif olmaları nedeniyle çok tercih edilirler



Şekil 5. a) Grafit yapısı b) Grafen yapısı

Karbon nanotüp için en yüksek ölçülen mukavemet 63 GPa'dır. Bu rakam, yüksek mukavemetli karbon fiberlerden daha güçlü olduğunu ifade eder.

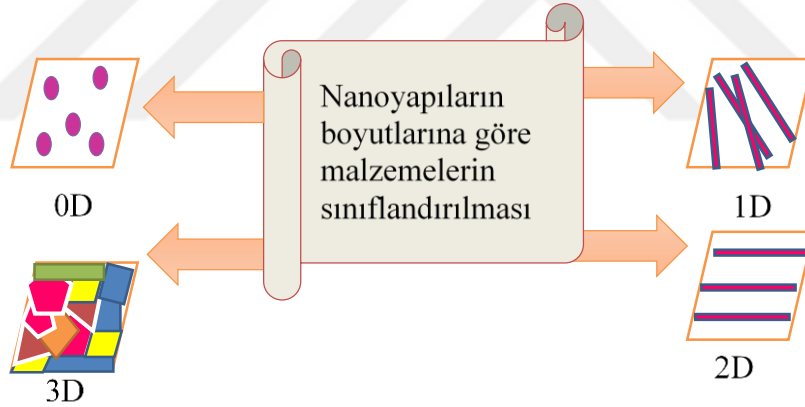


Şekil 6. Karbon nanotüp yapısı (Liu vd, 2011).

Karbon nanotüpler (CNTs), olağanüstü hafiflikleri, yüksek görünüş oranı, mukavemet ve sertliği ve pek çok işlevli özellikleri bakımından fazlaca tercih edilirler.

5.2.Karbon Nanotüp Çeşitleri

Karbon nanotüp çapı birkaç nanometre mertebesinde olup, 18 santimetre uzunluğunda olabilirler (Javey ve Kong, 2009). Nanotüpler 1 ila 100 nm arasında değişen çaplara ve milimetreye kadar olan uzunluklara sahip olabilirler (Kaushik ve majumder, 2017).



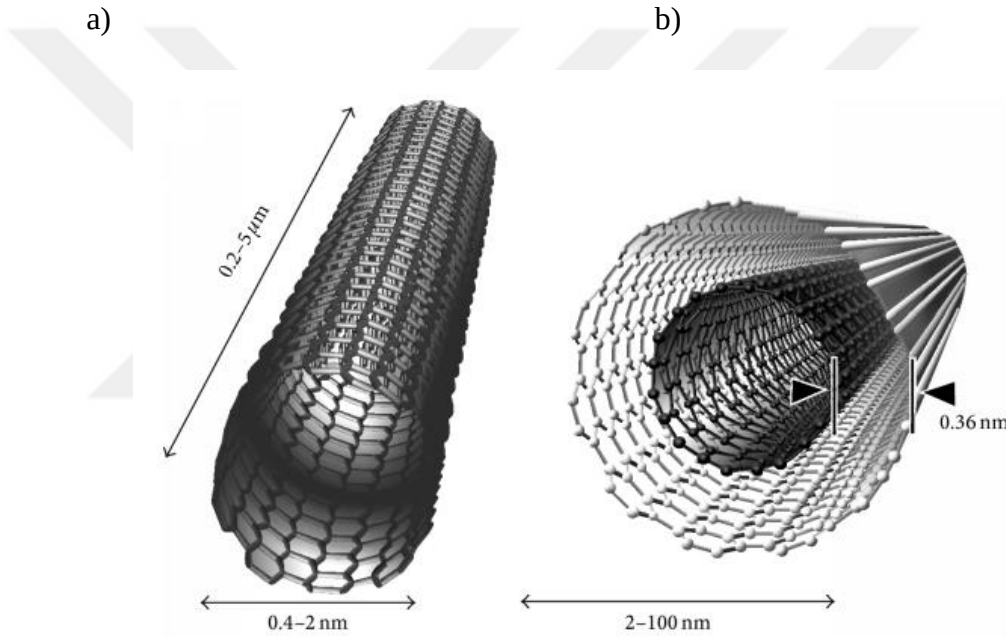
Şekil 7. Nano yapıların makroskobik boyutlara göre sınıflandırılması

Çok duvarlı nanotüpler (MWNT), konsantrik olarak oluşturulmuş ve grafitteki bazal düzlem ayrılmasına benzer şekilde 0.35 nm ile ayrılmış bu tür silindirlerin bir dizisinden oluşur (Iijima, 1991). Makroskobik boyutlarını inceleyecek olursak, sıfır, bir, iki, üç boyutlu olarak dört ana gruba ayrılmıştır.

- 0D: Nano parçacıklar, fulleren, kuantum noktaları.
- 1D: Nanotel, nanoçubuklar,
- 2D: Nanolevhalar, nanotüpler
- 3D: Nanofilmler.

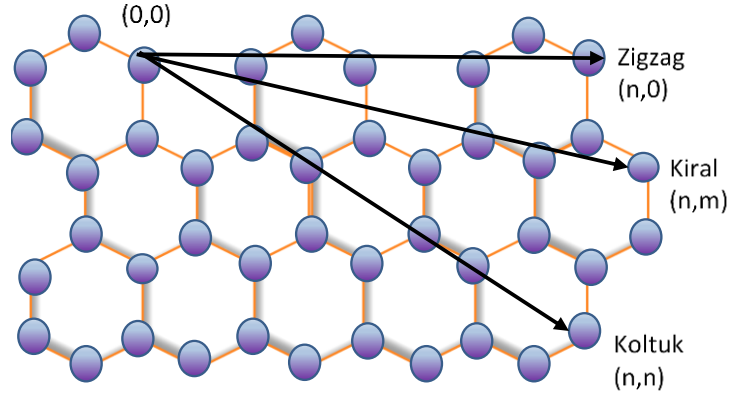
5.3.Karbon Nanotüp Çeşitleri (SWCNT ve MWCNT)

Tek cidarlı karbon nanotüplerinin (SWNT) istisnai mekanik özellikleri, SWNT kompozitleriyle ilgili yoğun çalışmalara neden olmuştur. Tek duvarlı CNT'ler tek bir grafen levhanın sarılmasıyla elde edilir. Uzunluk ve çap oranları, çoğul duvarlı CNT'lere göre daha düşüktür. Ayrıca, çok duvarlı (MWCNT) bir karbon nanotüpünün tek bir tabakasının ölçülen spesifik gerilme mukavemeti çelikten 100 kat daha yüksek olabilir ve grafen tabakası düşük gerinimde elmas kadar serttir (Ruoff,2003). Nano dolgu veya takviye olarak çoklu duvarlı karbon nanotüplerin kullanımı, teorik olarak öngörülen mükemmel mekanik özellikleri nedeniyle yakın zamanda artmıştır (Montazeri, 2010).



Şekil 8. a) Tek duvarlı karbon nanotüp b) Çoğul duvarlı karbon nanotüp (Iijima, 2002; Hirsch. 2002).

SWCNT'ler arasındaki etkileşimler Van Der Waals kuvvetlerine bağlıdır. Bir SWCNT'deki komşu karbon atomları arasındaki kovalent bağlar, Van Der Waals bağlarıyla karşılaştırıldığında, Van Der Waals etkileşimi oldukça zayıftır (Chou ve Li, 2003). Zayıf bağlanma nedeniyle bir MWCNT'deki tabakalar arasında kaymaların meydana gelebileceği tahmin edilmiştir (Wong vd,1997). Bu kaymaların etkisiyle, koltuk, kiral, zigzag yapılar oluşur.



Şekil 9. Koltuk, kiral, zigzag yapılarının gösterimi

Bu işlemle ilişkili geometrik parametre, grafen tabakaları n, m tam sayı çifti ile ilişkilendirilmiştir.

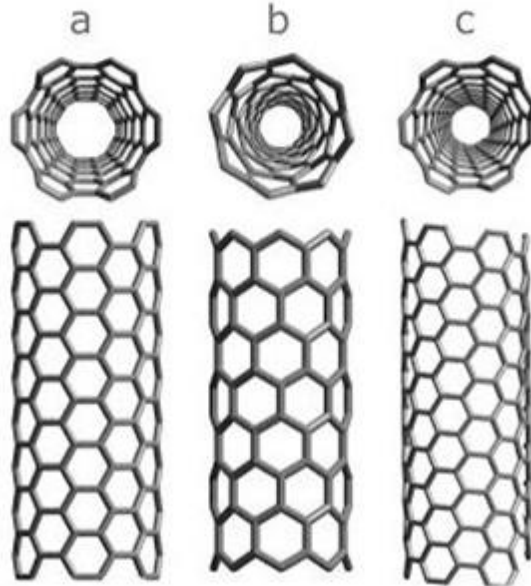
N ve m arasındaki ilişki de CNT'nin üç kategorisini tanımlar:

$$r = na + mb.$$

$$m = 0 \text{ \& } \theta = 30^\circ, \text{ 'Zigzag',}$$

$$n = m \text{ \& } \theta = 0^\circ \text{ 'Armchair',}$$

$$n > m \text{ \& } 0 < \theta < 30^\circ, \text{ 'Chiral'}$$



Şekil 10. (a) koltuk nanotube, (b) zig-zag nanotüp ve (c) kiral nanotüp şematik modeli (Terrones 2003).

5.4.Karbon Nanotüplerin Mekanik Özellikleri

Karbon nanotüplerin çekme mukavemeti $4,5 \times 10^{10}$ Pascal'dır. Gerilme mukavemeti, bir malzemeyi ayırmak için gereken gerilme miktarının bir ölçüsüdür. Aynı zamanda, çekme gerilmesi, CNT' ye uygulanan bir basınç veya kesit alanı başına kuvvet olarak tanımlanır. Buna karşılık, yüksek mukavemetli çelik alaşımların gerilme mukavemeti yaklaşık 2×10^9 Paskal'dır (Pa). CNT'ler çelikten yirmi kat daha güçlü olup Young modülleri, 1 TPa' dan daha büyük değerlere sahip tüm karbon elyaflarına göre daha üstündür (Sankar, 2011). Bununla birlikte, dayanımları onları birbirinden ayırır. Bir tera paskal, atmosfer basıncından yaklaşık yedi kat fazlasının basıncıdır. Çeliğin young modülü yaklaşık 0.21 TPa'dır, bu da CNT modüllerinin çelikten on kat daha büyük olduğu anlamına gelir. Young modülü Y,

$$Y = \frac{\sigma}{\epsilon}$$

σ , Gerilme

ϵ , gerinim

Young Modülü (Y), elastik modül olarakta bilinir. Young modülü, bir malzemenin sertliği hakkında bilgi verir ve Hooke yasası geçerli olduğunda Stres / Gerilim Oranı olarak tanımlanır. Aynı zamanda malzemenin yük altında elastik şekil değiştirmesinin ölçüsüdür. Young modülü Pascal (Pa) birimine sahiptir. Kuvvet(yük)-zorlanma ya da Enerji-gerilme eğrisinin eğiminin hesaplanmasıyla bulunabilir.

Ayrıca Young modülü (Y), enerjinin (E) ikinci türevinin, tüpün hacmine (V) bölünmesiyle bulunur.

$$Y = \frac{1}{V_0} \left(\frac{\partial^2 E}{\partial \epsilon^2} \right)$$

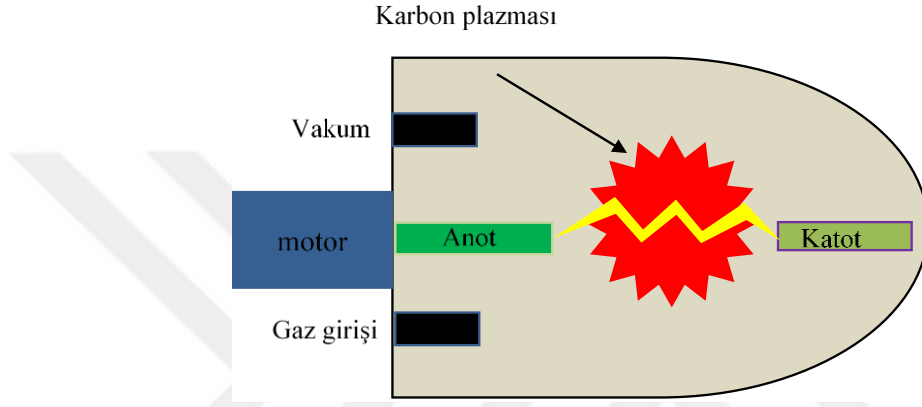
$$\epsilon = 0$$

5.5.Karbon Nanotüp Sentezleme Yöntemleri

Malzeme kusurları, üretim yöntemiyle doğrudan ilgilidir. Karbon nanotüpler, Tüp tipine göre genel teknikler kullanılarak üretilir. Bunlar, Ark deşarj, CVD (Kimyasal buhar biriktirme) ve lazer ablasyonu yöntemleridir. Bunlar üç ana üretim yöntemidir. Hem maliyeti hem de üretim kolaylığı sebebiyle en çok tercih edilen CVD yöntemidir (Ziebro vd, 2009).

5.5.1. Ark deşarj yöntemi

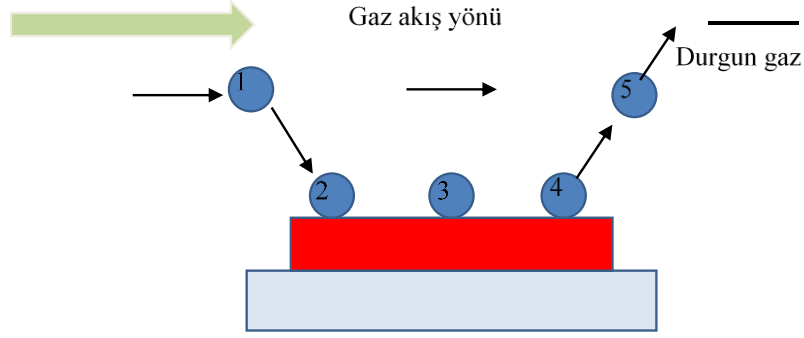
SWCNT karbon nanotüplerin ark deşarj cihazıyla üretimi, doğrusal fullerenlerin daha kapsamlı teorik ve deneysel araştırmalara teşvik etti (Bethune vd, 1993). Sumia Iijima Fullerenleri, Ark Buharlaştırma ile ilk üreten kişidir (Iijima ve ichihashi, 1993). Bu yöntemde, biri anot biri de katot olmak üzere hazırlanmış iki grafit çubuk arasında ark oluşacak şekilde bir mesafe oluşturularak uygulanan doğru akım sonucu nano tüp sentezlenmesi sağlanır (Küçükyıldırım vd, 2012).



Şekil 11. ARK deşarj yönteminin şematik gösterimi

5.5.2. CVD (kimyasal buhar biriktirme) yöntemi

Kimyasal buhar biriktirme yöntemi, karbon malzemeleri üretmek için hidrokarbonların metal katalizörler üzerinde kimyasal buharla biriktirilmesi yöntemidir (Cassell vd, 1999). Karbon nanotüp oluşumunda parametreler; sentez sıcaklığı, basıncı, reaksiyon süresi, hava akış hızları, katalizör ve destekleyici materyallerdir (Ago vd, 2006). Kaplama sıcaklığı, 500-1200°C arasındadır. Bununla beraber, işlem süreside kaplama kalınlığına göre değişir ortalama kaplama kalınlığı 10 μ m den azdır. Ancak, bu metotla üretilen karbon nanotüplerin farklı çap ve farklı çeper yapılarına sahip olması önemli kalite sorunudur.



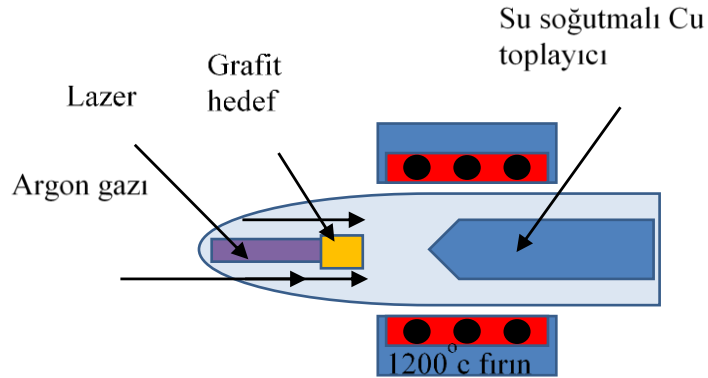
Şekil 12. CVD prosesi

Reaktantlar, tepkimenin girenleridir. CVD prosesi şöyledir ;

- 1, Yönünde substrat üzerine difüze olurlar.
- 2, Yönünde substrat yüzeyine adsorpsiyonu
- 3, Reaktant ile substrat arası kimyasal reaksiyon
- 4, Üründen gaz desorpsiyonu
- 5, Üründen atık gaz uzaklaştırm

5.5.3. Lazer ablasyonu yöntemi

Bir grafit parçanın hedef olarak kullanılması ve 500 Tor basınç altında yaklaşık 1200°C sıcaklıkta çalışan bir fırın içinde lazer ünitesiyle bombardımanı ile CNT sentezlenmesi gerçekleştirilmektedir (Küçükyıldırım vd, 2012).



Şekil 13. Lazer ablasyon işleminin şematik gösterimi

Çizelge 7. CNT sentezleme yöntemlerinin avantaj ve dezavantajları (Enşici, 2004).

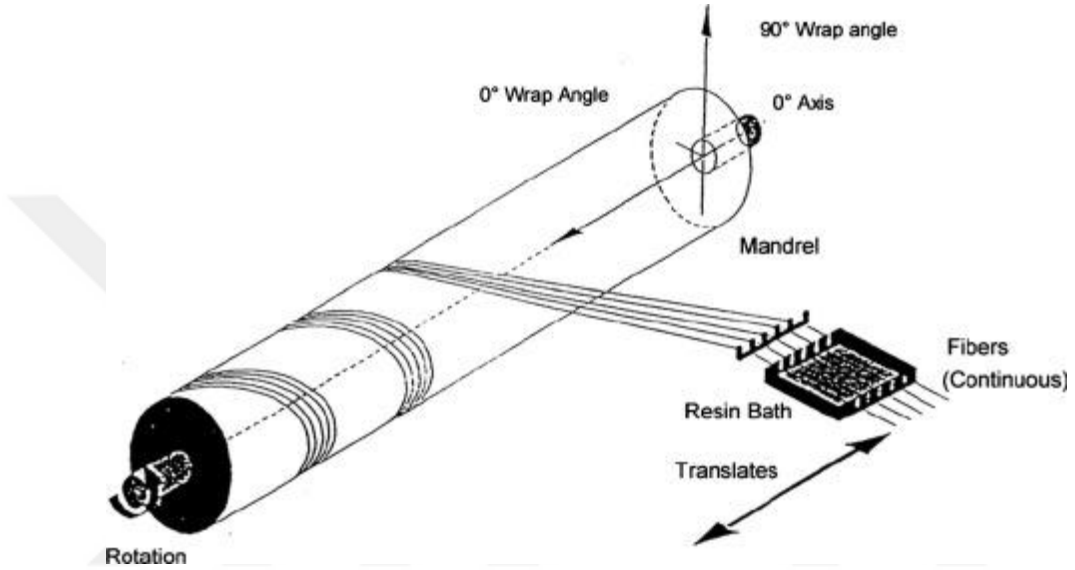
Yöntem	Verim	Avantajlar	Dezavantajlar
Ark deşarjı	30-90	Basit işlem, ucuz, yüksek verim, $\text{çap} = 1\text{-}20\text{ nm}$	Rastgele uzunluktaki kısa tüpler, kesikli proses
Lazer ablasyonu	70	Yüksek saflık, iyi çap kontrolü	Ekipmanın maliyeti yüksek, kesikli proses
Kimyasal buhar biriktirme	95	Yüksek saflık, uzun tüpler, kolay işlem, sürekli proses, $\text{çap}=0,8\text{-}2\text{ nm}$	Yüksek kusurlar mevcut

BÖLÜM 6

KOMPOZİT MALZEME ÜRETİM YÖNTEMLERİ

6.1 Elyaf Sarma Yöntemi

Elyaf sarma yöntemi, sürekli elyaf liflerinin reçine banyosunda ıslatılmasıyla ileri geri hareketlerle hareket eden gezici araç sayesinde dönen mandrel kalıp üzerine sarılması işlemidir.

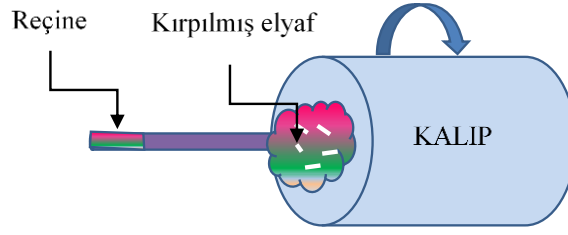


Şekil 14.Çift taraflı/sürekli elyaf sarma prosesi (Rafiee, 2013).

Silindirik borular, şaftlar, su tankları, yat direkleri, dairesel basınç tankları,tren vagonları bu yöntemle üretilirler. Elyaf sarma yöntemi, istenilen mukavemette üretim yapılabilmesi, işçilik gereksiminin az olması, geniş takviye ve reçine alanı, otomasyon kolaylığı, termoset veya termoplastik kompozit üretme imkânı sağlar.

6.2. Santrifüj (Savurma) Döküm Yöntemi

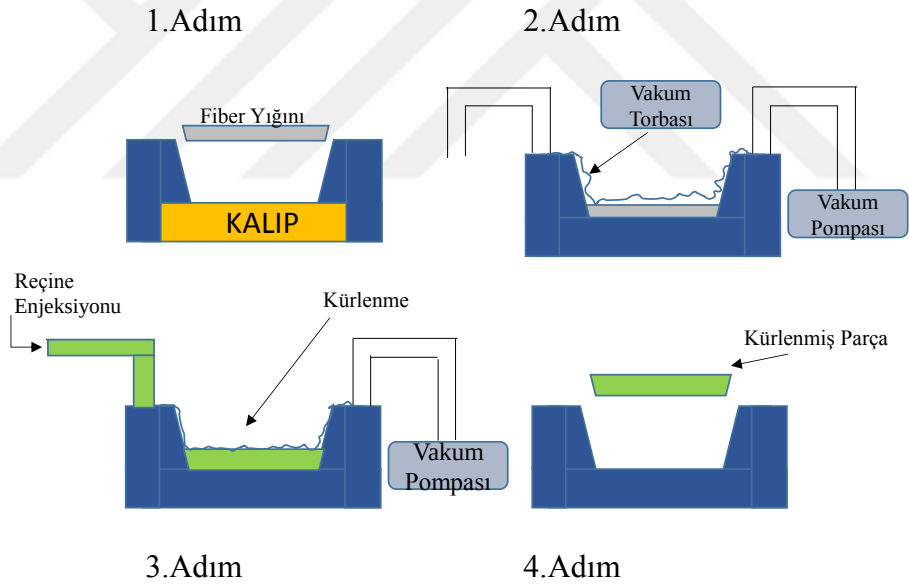
Santrifüj kalıplamada takviye malzemesi ve reçine, sertleştirici karışımı merkezkaç kuvvetinin etkisiyle dönen kalıp iç yüzeyine sıcak havayla beraber uygulanır. Merkezkaç kuvveti, reçine ile temas eden takviye liflerinin ıslanmasını kolayca sağlamaktadır. Genellikle silindirik kapların imalinde kullanılır. Santrifüj kalıplamanın avantajları, düzgün dış yüzeylerin elde edilmesi ve uçucu organik gazların proses sırasında kontrol edilebilmesidir. Başlıca dezavantajı ise, büyük boyuttaki kalıpların döndürülebilme sorunu ve iç yüzeye tül uygulamasının zorluğudur (Genç vd, 2008).



Şekil 15. Santrifüj Kalıplama Yöntemi

6.3.Vakum yardımcı reçine transferi yöntemi (VARTM)

VARTM, birçok kaynakta torba kalıplama yöntemi adıyla da yer almaktadır. Bu yöntemde, malzeme vakum tablasının üzerine konarak tablanın üzeri vakum torbası ile kapatılarak sızdırmazlık sağlanır. Torbanın içerisindeki hava vakum altına alınır. Vakumun etkisiyle, vakum torbası iş parçasının üzerini kaplar ve malzemeye basınç uygular. Vakumlanmış ortam içerisinde reçinenin enjekte edilerek işlem sonunda malzeme üretimi gerçekleşmiş olur (Genç vd, 2008).



Şekil 16. VARTM sisteminin uygulanması

6.4. RTM (Reçine Transfer Metodu)

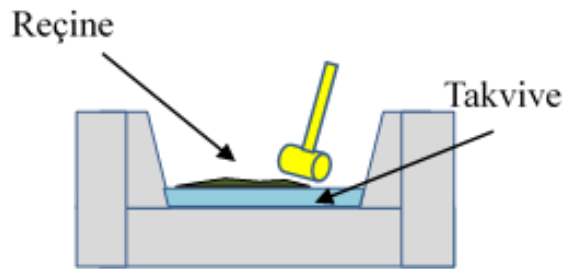
Kesilerek hazırlanan takviye malzemesinin kapalı bir kalıp içine konularak kalıp boşluğu doldurulacak şekilde kalıba yerleştirilir ve kalıp klempler aracılığıyla kapatılır kapatılır. Vakum altında reçine, kalıp içerisine reçine pompalanır. Tahliye çıkışı sayesinde reçine fazlası alınır. En çok 80 °C ye kadar ısıtılmış kaplarda uygulanabilir. RTM ile imal edilen tabakalı kompozitlerde yapı sıkılaştıkça veya fiber oranı arttıkça, gerekli olan enjeksiyon basıncı da artmaktadır. Ayrıca kontrollü bir vakum desteği, daima hava boşluğu yüzdesini azaltmaktadır (Brocks vd, 2013).



Şekil 17. RTM Cihazı

6.5. El Yatırması ve Püskürtme Yöntemi

Bu yöntemler, kompozit malzeme üretiminin en temel kalıplama yöntemleridir. Her iki yöntemde, takviye malzemesinin kalıba yatırılması ve sıvı reçine uygulanması aşamalarını kapsar.

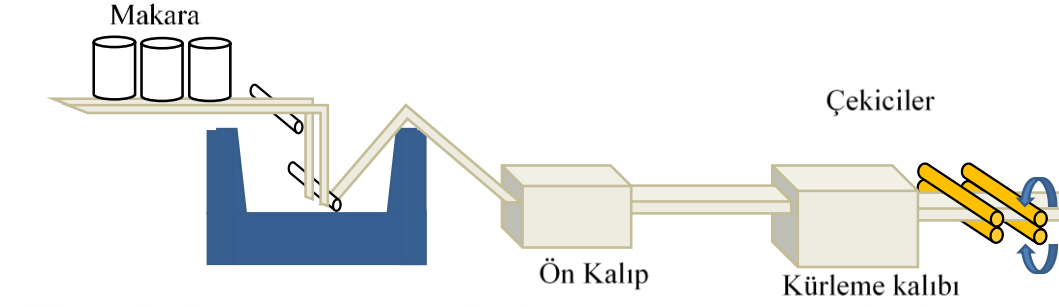


Şekil 18. El yatırması yöntemi

El yatırması yönteminde, reçine ve takviye eklenmesi el ile yapılırken püskürtme işleminde püskürtme cihazı ile gerçekleştirilir. İlk olarak jelkot kalıp yüzeyine uygulanır. Jelkot sertleşince üzerine takviye malzemesi yerleştirilir ve reçine eklenir.

Bir rulo yardımıyla reçine sertleşene kadar rulolama yapılır. Bu sayede tabakalar arasındaki hava kabarcıkları giderilir. Püskürtme yönteminde, reçine ve takviye malzemesi kalıba püskürtülerek uygulanır.

6.6. Pultruziyon Yöntemi-Profil Çekme Yöntemi



Şekil 19. Pultruziyon kalıplama yöntemi

Elyaf, termoset reçine içine daldırılarak istenilen elyaf/hacim oranında ön kalıptan geçirilir. Ardından kürlenme kalıplarından geçirilerek fırına gönderilir. Son kalıptan geçen malzemenin üretimi tamamlanmış olur.

BÖLÜM 7

MATERYAL VE YÖNTEM

7.1. Materyal

0 ° / 90 ° yönünde, 3D çift eksenli çözgülü örme kumaşlar takviye malzemesi olarak kullanılmıştır. E-Cam elyafları Metyx Composites Corporation, İstanbul / TÜRKİYE tarafından sağlanmıştır. Epoksi ve sertleştirici ise Araldite LY 3598, Aradur 349, Huntsman tarafından ALMANYA'dan tedarik edilmiştir. Epoksi, açık sarı renğinde, yoğunluğu 1,10-1,20 gr/cm³, viskozitesi 1600-220 mPa-s arasındadır. Jelleşme süresi 15 dk civarında olup kap ömrü 40-70 dk arasındadır. Sertleştirici ise açık sarı renğinde, 5-20 mPa-s viskozitede, 0,95-1,0 gr/cm³ yoğunluğunda, kap ömrü 40-70 dk arasında, jelleşme süresi ise 14-15 dk. arasındadır. MWCNT'li ve MWCNT'leri olmayan iki tip termoset kompozit üretildi. Çok duvarlı karbon nanotüp (MWCNT) malzemeleri, Ege Nanotek Kimya Sanayi Limited Şirketi tarafından İzmir TÜRKİYE'den temin edildi.

Çizelge 8. MWCNT'lerin fiziksel ve kimyasal özellikleri (%95)

Özellik	Değer
Saflık	>%95 (karbon nanotüp) >%97 (karbon içeriği)
Dış çap	10-20 nm
İç çap	5-10 nm
Uzunluk	10-30 μm
Yüzey alanı	>200m ² /g
Renk	siyah
Ash	Kütlece < %1.5
Elektrik iletkenliği	>100 S/cm
Özkütle (tap)	0.22 g/ cm ³
Özkütle (true)	~2.1 g/cm ³

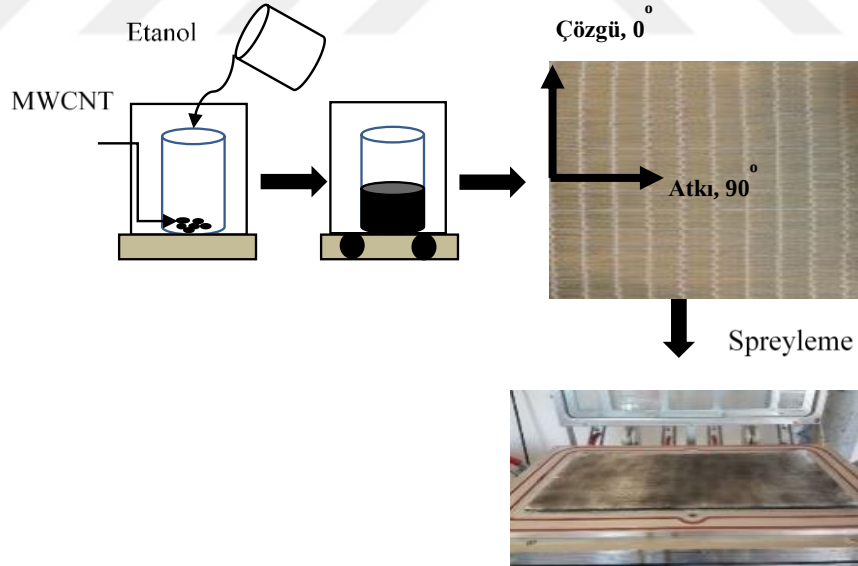
Çizelge 9. Çift eksenli çözgülü örme kumaşın verileri

E-cam elyafı	0°(Çözgü) ipliği, Tex	90°(Atkı) ipliği, Tex	Çözgü ipliği Alan ağırlığı 0° (gr/m ²)	Atkı ipliği Alan ağırlığı 90° (gr/m ²)	Kumaş Alan ağırlığı (çözgü, atkı, örgü ipliği) (gr/m ²)
LT1200E 05B 0/90 (G5)	2400	1200	566	614	1187

7.2. Yöntem

7.2.1. Numune Hazırlama

Her kat için, ayrı ayrı 100 ml, 100 ml, 50 ml etanol çözeltisine MWCNT'ler eklenerek üç çözelti hazırlandı. Katlarda kullanılan, etanol ve MWCNT ağırlık dağılımları çizelge 10'da verilmiştir. MWCNT'ler, homojen dağılım elde edebilmek için, önce manyetik karıştırıcıda (7dk.) sonra ultrasonik karıştırma (15 dk., 1000 rpm. hızda) işlemine tabi tutuldu. İşlem basamakları şekil 20'de şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 20. CNT dağıtma aşamaları

Manyetik karıştırıcı ve ultrasonik karıştırma yöntemlerinden sonra, aglomerasyon oluşumu da engellendi. Bu işlem MWCNT'lerin homojen dağılması için yapılmış bir işlemdir.

7.2.2. Sprey metodu

Toplam kompozit plaka ağırlığı (4 kat olup yaklaşık, 1250 gr elyaf + 1250 gr epoksi içerir.) yaklaşık 2500 gr olarak hesaplandı. MWCNT'ler dört kat kumaşın her katına eşit şekilde bölünerek, havalı tabanca yardımıyla 100 ml ön yüz, 100 ml arka yüz ve 25 ml ön, 25ml arka yüz olarak, spreyleme işlemi yapıldı (1 kat için kullanılan MWCNT miktarı, $5 \div 4 = 1,25$ gr'dır).

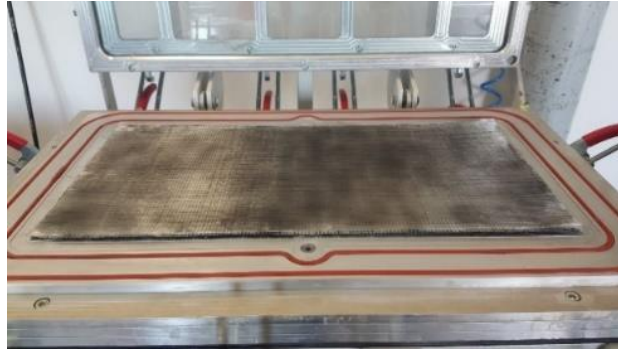


Şekil 21.Spreyleme alanında cam kumaş

Spreylenen kumaşlar RTM kalıbına simetrik ve dengeli şekilde 2 kat ön yüz 2 kat arka yüz üste gelecek şekilde yerleştirildi. Daha sonra, RTM prosedürlerine göre üretime hazır hale getirildi.

Çizelge 10. Elyaf yüzeyine püskürtmede uygulanan bileşenler ve oranları

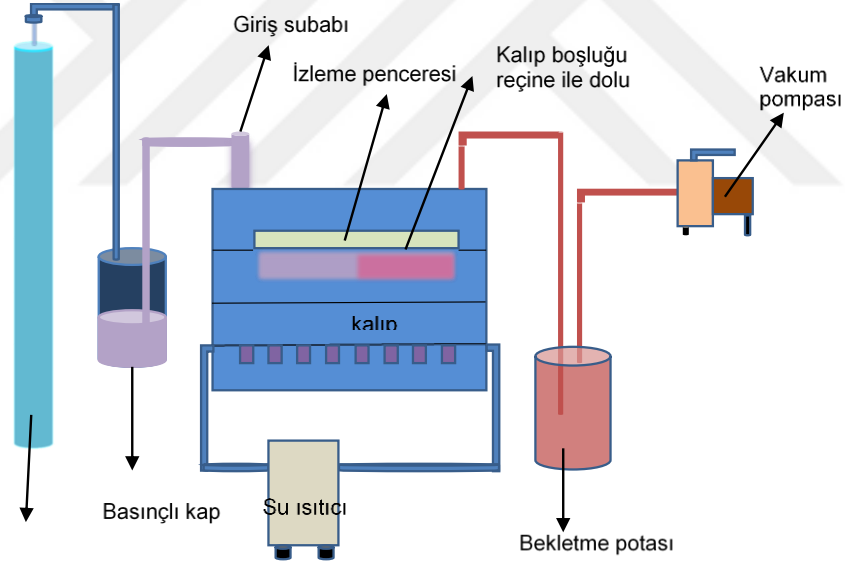
KAT SAYISI	MWCNT (gr)	ETANOL (gr)	≈ Toplam (gr)
1.KAT	0,4954	99,5015	100
	0,4930	99,5046	100
	0,2468	49,7609	50
2.KAT	0,4934	99,5069	100
	0,4940	99,5081	100
	0,2470	49,7782	50
3.KAT	0,4959	99,5055	100
	0,4997	99,7772	100
	0,2483	49,7772	50
4.KAT	0,4996	99,5004	100
	0,4949	99,5003	100
	0,2456	49,7608	50



Şekil 22. 4 kat % 0,2 CNT entegre edilmiş kumaş

7.2.3. RTM Sistemi ile kompozit malzeme üretimi

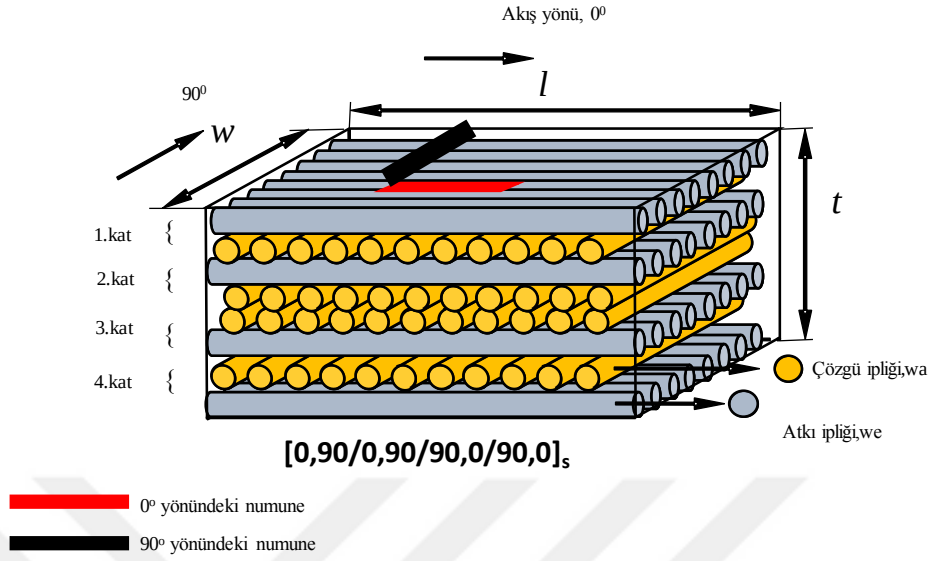
RTM sistemi, Şekil 2 'de görüldüğü gibi kilitli, iki parçalı bir sistemdir. RTM sistemi ile hızlı ve dayanıklı kompozit malzeme üretimi yapmak mümkündür. RTM sistemi 620mmx320mmx4,4mm ölçülerine sahip kapalı bir sistemdir.



Şekil 23. Rtm proses şeması

RTM için üretim aşamaları şöyledir: Elyaf, bir tanesi yaklaşık 315gr ve toplam dört elyaf ağırlığı 1260 gr'a tekabül eden, dörder adet elyaf kesildi. Kumaşların dört tabakasının her iki yüzü, etanol ve MWCNT 'lerin hazırlanmış çözeltisi ile kaplandı (kumaşların dört yüzü hazırlanırken her biri çözelti ile kaplandı). Kesilmiş cam fiber kumaşlar, Reçine Transfer Kalıplama (RTM) cihazının kalıp boşluğuna simetrik ve dengeli bir biçimde yerleştirildi. Kap içerisine, vakum altında reçine (Epoksi ve sertleştirici 100/21 oranında karıştırılmıştır) transfer edilerek elyafların homojen

olarak ıslanması sağlandı. 65°C kür sıcaklığında 24 saat ve sonra 80°C’de post kür için bir 24 saat daha bekletildi.



Şekil 24. 4 kat istiflenmiş RTM cihazına yerleştirilen cam elyafın şematik gösterimi

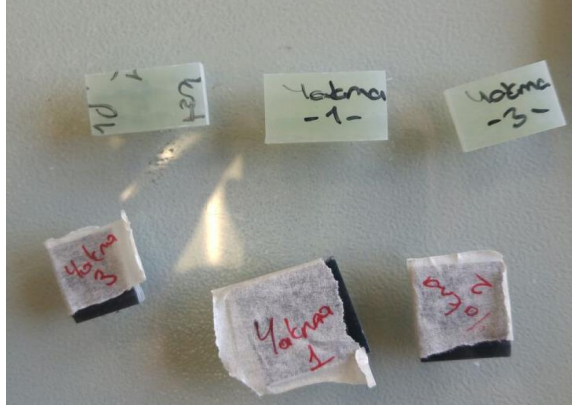
Üretilen parçalardan numuneler alınarak test aşamalarına geçildi. MWCNTs ağırlık yüzdesi, imal edilmiş kompozit panellerde %0,2’dir. Üretilen toplam kompozit plaka ağırlığı ise 2500 gr’dır. %0 MWCNT ve %0,2 MWCNT içeren iki plaka için, epoksi ve sertleştirici ağırlıkları, çizelge 11’de gösterilmiştir.

Çizelge.11. Üretilen kompozit plakaların epoksi ve sertleştirici oranları

Plaka sayısı	İçerik	Epoksi (gr)	Sertleştirici (gr)
1	%0 MWCNT	2038	428
2	%0,2 MWCNT	2087	442

7.3.Yakma Testi

Kompozitler imal edildikten sonra, termoset kompozitlerindeki bileşenlerden her birinin yüzdesini (liflerin hacim oranını) belirlemek için bir süre fırınında yakma testi gerçekleştirildi.



Şekil 25.Yakma numuneleri

Çizelge 12’de, çift eksenli çözgülü örme (BWK) kumaş takviyelerinin ve liflerin hacim oranının parametrelerini göstermektedir.

Yakma yöntemi prensibi, ASTM D3171-99 standartlarına göre yapılmış olup, şöyle uygulanmıştır:

- Numune yoğunluğu (ρ_c), elyaf yoğunluğu (ρ_r), ilk numune ağırlığı (M_i) ve numunelerin konulacağı kap ağırlıkları ölçüldü.
- Matriks, 5 saat boyunca 620°C 'lik bir sıcaklığa sahip olan kül fırını kullanarak uzaklaştırıldı.
- Potalarda kalan takviye liflerinin (M_f) kütlesi, % elyaf hacim oranı (V_r) ve % elyaf ağırlık oranını (W_r) belirlemek için aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplandı (Korkmaz vd, 2016).

Yüzde elyaf ağırlığı (W_r);

$$W_r = \frac{M_f}{M_i} \times 100$$

M_i : İlk numune ağırlığı (gr)

M_f : Yakma işleminden sonraki numune ağırlığı (gr)

Yüzde elyaf hacim oranı (V_r);

$$V_r = \frac{M_f}{M_i} \times 100 \times \frac{\rho_c}{\rho_r}$$

ρ_m : Matris yoğunluğu (1,20 gr/cm³)

ρ_r : Elyaf yoğunluğu

Kompozit yoğunluğu(ρ_c); $\frac{M_i}{A \times h \times 0.001}$

Yüzde matris ağırlık oranı (W_m);

$$W_m = \frac{W_i - W_f}{W_i} \times 100$$

Yüzde matris hacim oranı (V_m);

$$V_m = W_m \times \frac{\rho_c}{\rho_m}$$

Ayrıca, $V_m + V_r = 1$ 'dir.

ASTM 2734-16'ya göre porozite hacim oranı hesabı

Teorik yoğunluk (T_d);

$$T_d = \frac{100}{\left(\frac{R}{D} + \frac{r}{d}\right)}$$

R : kompozitteki % Matris ağırlığı

r : kompozitteki % takviye ağırlığı

D : Matris yoğunluğu

d : Takviye yoğunluğu

V : Hacim

A : Alan

h : Kalınlık

T_d : Teorik yoğunluk

M_d : Kompozit yoğunluğu

Porozite hacim oranı (V_b);

$$V_b = 100x\left(\frac{T_d - M_d}{T_d}\right)$$

Çizelge 12. Kompozitlerin elyaf hacim oranları

İçerik	Örnek	Kalınlık (mm)	En (mm)	Uzunluk (mm)	Hacim (mm ³)	Kap ağırlığı (gr)	Yakma öncesi ilk ağırlık (gr)	Yakma sonrası ağırlık (gr)	Numune yoğunluğu (gr/cm ³)	Elyaf ağırlığı (gr)	Cam elyafın yoğunluğu (gr/cm ³)	Hacim oranı (%)	Ortalama (%)
Epoksi	A	5,140	14,73	23,93	1810	23,51	26,50	25,13	1,64	1,61	2,60	34,4	
	B	4,890	13,20	22,72	1467	19,13	21,62	20,52	1,69	1,39	2,60	36,4	35,8
	C	4,970	13,90	19,46	1340	17,98	20,25	19,24	1,69	1,26	2,60	36,1	
Epoksi + %0,2 CNT	A	4,630	21,27	21,49	2110	19,77	23,45	21,98	1,74	2,21	2,60	40,2	
	B	4,870	20,56	17,55	1750	22,65	25,63	24,37	1,69	1,72	2,60	37,7	38,3
	C	4,840	17,37	14,01	1170	19,88	21,86	21,01	1,68	1,13	2,60	37,0	

Atkı liflerinin elyaf hacim oranı hesabı:

Atkı liflerinin ağırlığı/fiber ağırlığı x elyaf hacim oranı

%0 MWCNT için,

%0,2 MWCNT için,

$$\frac{614}{1187} = 0,522, 0,522 \times 35,8 = 18,5 \quad ; \quad \frac{614}{1187} = 0,522, 0,522 \times 38,3 = 19,9$$

Çözümlü liflerinin elyaf hacim oranı,

Çözümlü lifleri ağırlığı/ fiber ağırlığı x elyaf hacim oranı

$$\frac{566}{1187} \times 35,7 = 0,477, 0,477 \times 35,8 = 17,1 \quad ; \quad \frac{566}{1187} \times 35,7 = 0,477, 0,477 \times 38,3 = 18,2$$

Örgü ipliği hacim oranı hesabı:

$$35,7 - (17 + 18,8) = 0,1 \quad ; \quad 35,8 - (19,9 + 18,2) = 0,14$$

Çizelge 13. Atkı,çözümlü,örgü ipliği hacim oranları

Kompozit	Atkı Lifleri (%) Vf	Çözümlü Lifleri (%) Vf	Örgü İpliği (%) Vf	Toplam (%) Vf	Kalınlık (mm)
% 0,0 MWCNT	18,6	17,1	0,1	35,8	5,0
% 0,2 MWCNT	19,9	18,2	0,14	38,3	4,8

Çizelge 14. Kompozitlerdeki porozite hacim oranı

EPOKSİ	%V_m	%V_r	%V_b
A	62,8	34,2	1,70
B	61,2	36,4	1,74
C	61,4	36,1	1,74
EPOKSİ+CNT			
A	58	40,2	1,69
B	59,4	37,7	1,74
C	43	57	1,20

BÖLÜM 8

FİZİKSEL VE MEKANİK KARAKTERİZASYON

8.1.Çekme Testi

Çekme testi, bir numunenin kopana dek tek eksenle çekme kuvvetlerine maruz bırakıldığı temel bir mekanik testtir. Testten elde edilen sonuçlar herhangi bir uygulama için malzeme seçimi, kalite kontrol ve malzemenin diğer kuvvetler altında nasıl davranacağını tahmin etmek için kullanılır. Bu test sonucunda malzemenin maksimum uzaması, kesit daralması, maksimum çekme dayanımı elde edilir.

Çekme ve eğilme testleri INSTRON 5982 kullanılarak 100 kN yük altında yapıldı. Çekme ve üç noktalı eğilme testleri için ilerleme hızı 1 mm / dk olarak ayarlandı. Aynı zamanda, Örneklerin genişliği ve uzunluğu, gerilme testlerinde 20 mm ve 200 mm'dir.



Şekil 26. INSTRON 5982 üniversal test makinesi

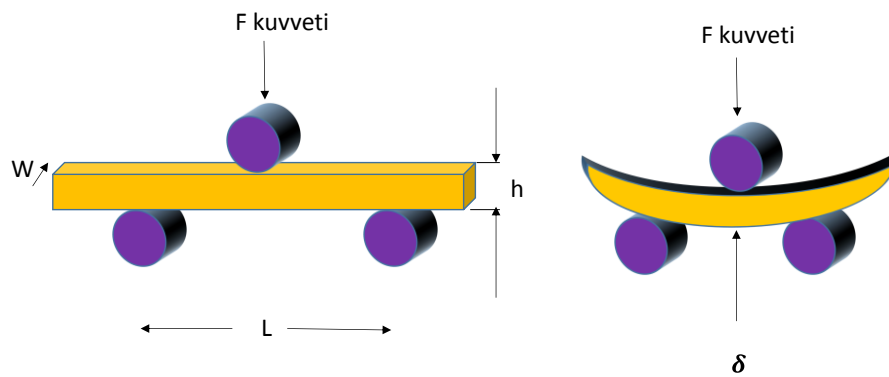


Şekil 27.Çekme testi test cihazı ve numune pozisyonu

8.2. Üç Nokta Eğme Testi

Eğme deneyi, malzemelerin eğmeye karşı mekanik özelliklerini tespit etmek amacı ile yapılır. Eğme deneyi ile malzemenin elastisite (Young) modülü, eğilme momenti, eğme dayanımı ve maksimum sehim miktarı tespit edilir. Eğme testi INSTRON 5982 marka universal test makinesi kullanılarak 100 kN yük altında uygulanmıştır.

Üç nokta eğme testi için, imal edilen kompozit plakalardan, üçer numune kullanılmıştır. Numunelerin ölçüleri ASTM-D790 standartlarına göre belirlendi. Numune ölçüleri, 80 mm uzunluğunda, 15 mm genişliğinde ve 3 mm kalınlığındadır.



Şekil 28. Üç nokta eğme deneyi düzeneği

8.3.SEM Görüntüleri

Karakterizasyon yöntemlerin en önemlilerinden biri, SEM görüntüleme yöntemidir. Bu yöntemin temel amacı; elektronlar aracılığı ile malzemenin kırılma yüzeylerinden yüksek çözünürlüklü üç boyutlu (3D) görüntü almaktır. SEM analizleri KİTAM’ da JEOL markası JSM-7001F model cihazda yapılmıştır.



Şekil 29. SEM görüntüleme cihazı

BÖLÜM 9

BULGULAR VE TARTIŞMA

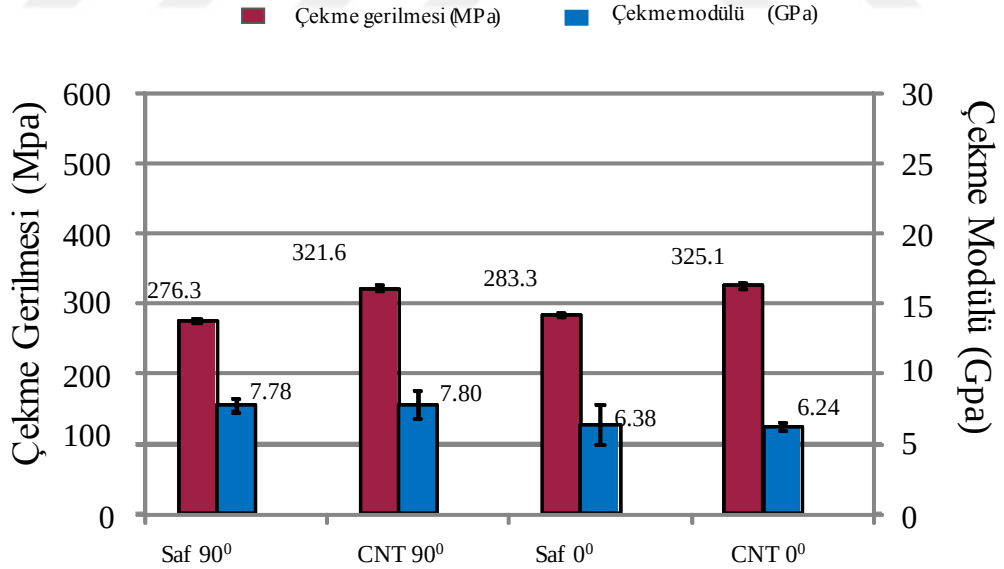
9.1. Bulgular ve Tartışma

Şekil 29’da çekme testi numune örnekleri gösterilmiştir. 0^0 ve 90^0 yönlerinde kesilen 3 adet 0^0 %0,2 MWCNT takviyeli, 3 adet 90^0 %0,2 MWCNT takviyeli, 3 adet 0^0 %0 MWCNT, 2 adet 90^0 %0 MWCNT numunelere uygulanmıştır. 200mm x 20mm boyutlarında yaklaşık 12 numune test edilmiştir.



Şekil 30. Çekme numuneleri %0,2 CNT (solda) %0 CNT (sağda)

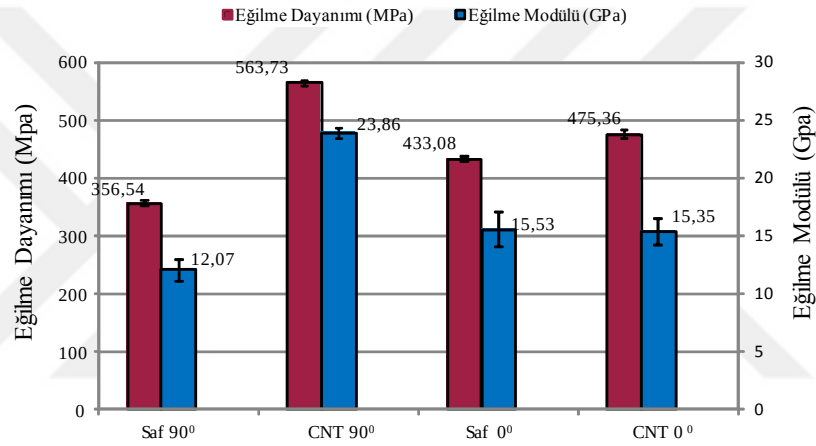
Şekil 31’de ise çekme testi sonuçlarının grafiksel ifadesi yer almaktadır.



Şekil 31. Çekme testi sonuçlarının grafiksel ifadesi

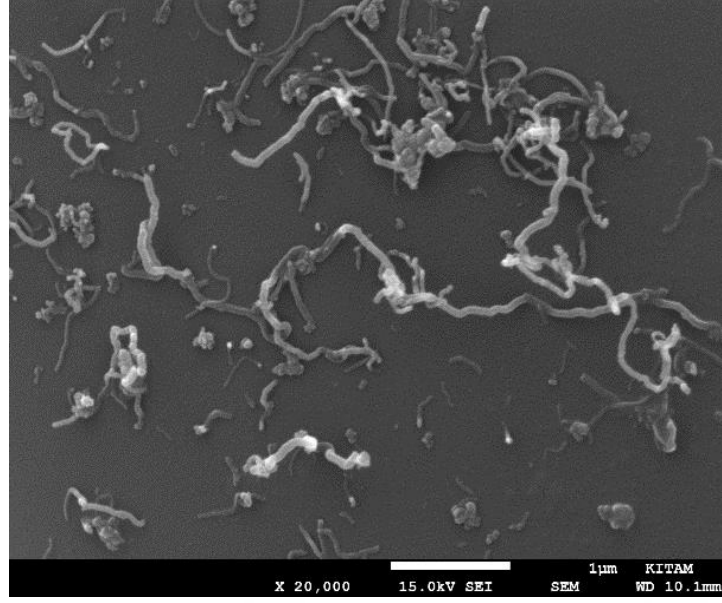
0^0 ve 90^0 doğrultularında ağırlıkça %0 ve ağırlıkça %0,2 MWCNT içeren termoset kompozit örneklerinin gerilme modülü ve mukavemetinin sonuçlarını gösterilmiştir.

%0 MWCNT'lerde atkı liflerinin hacim oranı (%18,5) çözgü liflerinden (%17,1) daha yüksek olduğundan, ağırlıkça %0 ve ağırlıkça %0,2 MWCNT'lere sahip olan kompozitler için, 0 ° yönünde test edilen örnekler (283 MPa ve 325 MPa) 90 ° yönündekilerden (276 MPa ve 322 MPa) daha büyük bir gerilme mukavemetine sahipti. Ayrıca, 0 ° doğrultusundaki numuneler arasındaki mukayesede CNT içeren numunelerin çekme mukavemeti, CNT içermeyenlere göre, %14,8 oranında fazla olduğu hesaplandı. 90 ° yönündeki numunelerde ise, CNT içeren numunelerin çekme mukavemeti CNT içermeyenlere göre %16,4 oranında fazla olduğu hesaplandı.

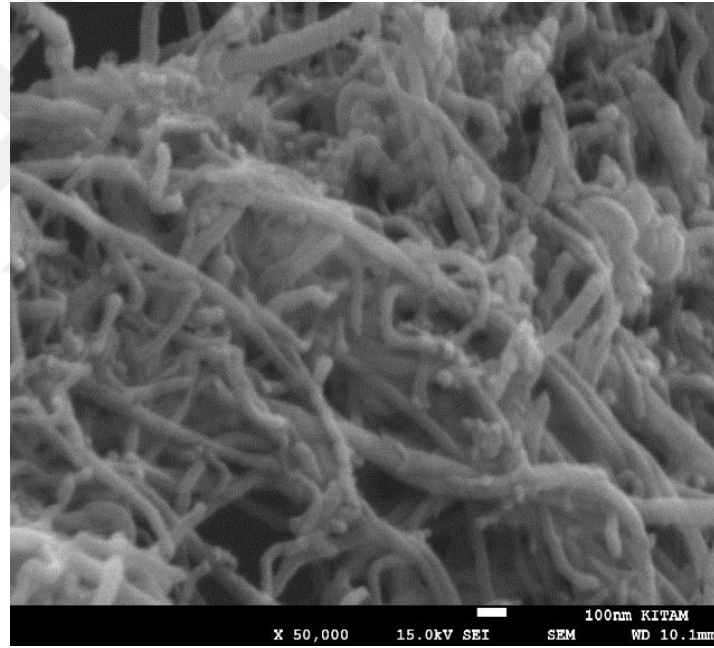


Şekil 32. Eğme Testi sonuçları grafiksel ifadesi

Şekil 32’de 0 ° ve 90 ° doğrultularında, ağırlıkça %0 yani, MWCNT içermeyen ağırlıkça %0,2 MWCNT'leri olan termoset kompozitlerin örneklerinin eğme modülüsü ve mukavemetinin sonuçları gösterilmektedir. Saf kompozitin, atkı liflerinin hacim oranı (%18,5) çözgü liflerinden (%17,1) daha yüksek olduğundan, 90 ° yönünde ağırlıkça %0,2 MWCNT olan numuneler, 0 ° yönünde %0,2 MWCNT içeren numunelere göre daha yüksek eğme modülüne ve mukavemetine sahiptir. MWCNT eklentisi özellikle eğme modülünün özelliklerini her iki doğrultuda fark edilir derecede iyileştirmiştir. Bununla beraber, 90 ° yönünde ve ağırlıkça %0,2 MWCNT bulunan numuneler, sırasıyla %97 ve %58 ile en iyi eğme modülü ve mukavemetini göstermiştir. MWCNT katkılı numunelerde atkı elyaf hacim oranı %19,9 çözgü liflerinin hacim oranı ise %18,2 bulunmuştu. SEM görüntülerinde, kompozit malzemenin kırılma yüzeylerinden görüntü alınmış olup, kompozit malzeme içindeki MWCNT’ler görülmektedir.



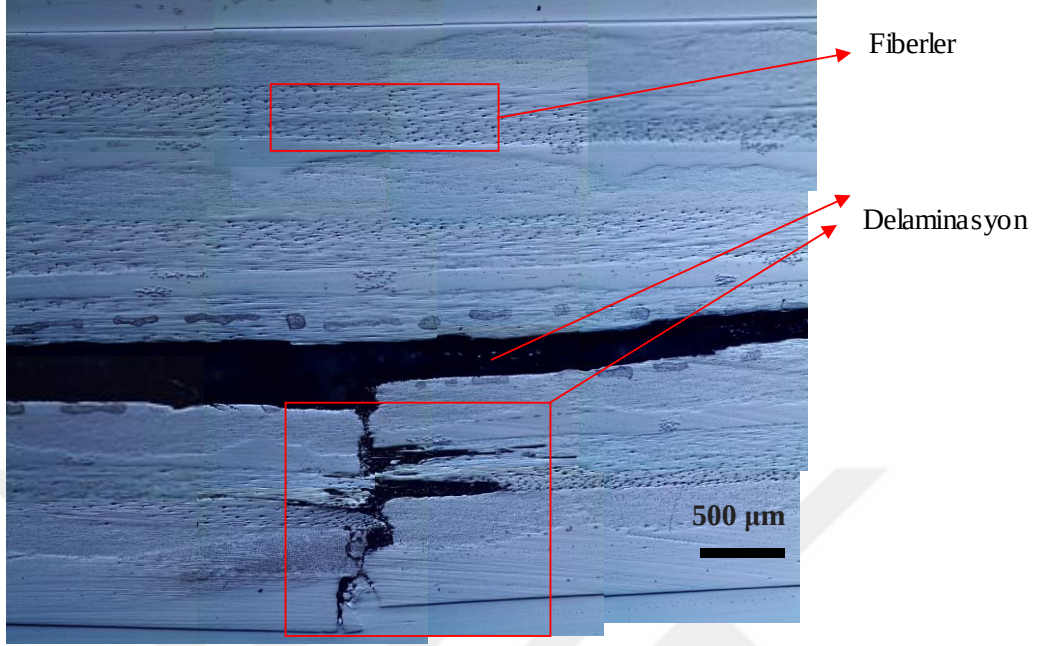
Şekil 33. %0,2 CNT içeren cam elyafın SEM görüntüsü (20.000X büyütme oranı)



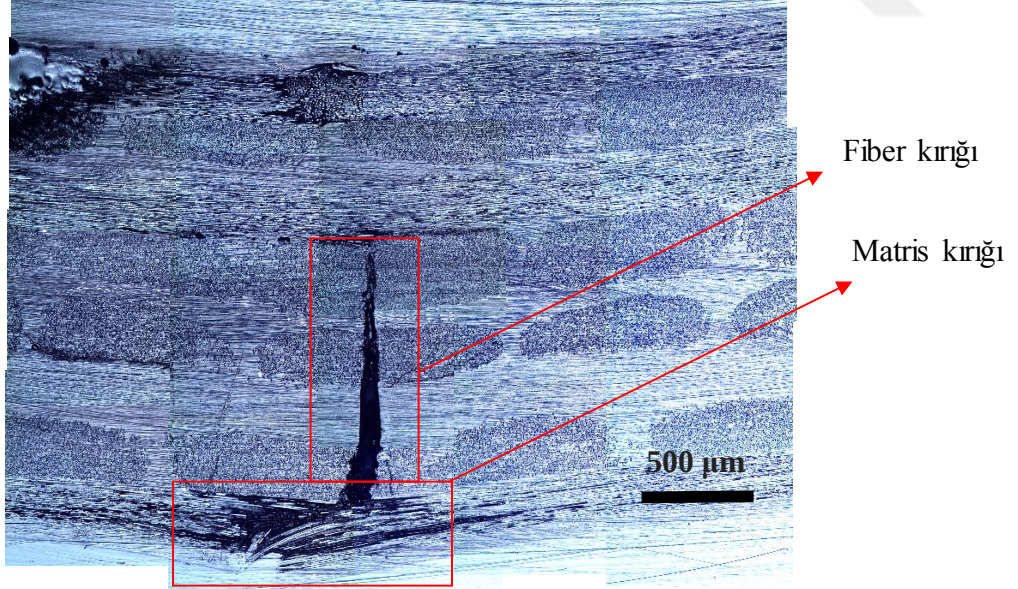
Şekil 34. %0,2 CNT içeren cam elyafın SEM görüntüleri (50.000X büyütme oranı)

Daha sonra eğme testi numuneleri, optik mikroskop görüntüleri alınmak üzere numune hazırlama aşamaları uygulandı. Kalıba alınma işlemini tamamlayan 2 numune örneği (%0, %0,2 MWCNT), 180, 400, 800, 1200, 2500'lük zımparalarda 2 şer dakika zımparalama işlemine tutuldu. İşlem sonrasında, optik mikroskop görüntüleri çekildi. Optik mikroskop görüntüleri, eğme testi sonuçlarına göre incelenmiştir. Eğme testi yüklemesine bağlı olarak, malzemede kırıklar tespit edilmiştir. Bu kırıklar, çekme ve eğme testi sonuçlarından elde edilen verilere göre,

90° doğrultusunda %0,2 MWCNT içeren numunelerde, belirlenen deformasyon %0 içeriklilere göre daha azdır.



Şekil.35. Saf (%0 CNT) 90° doğrultusunda saf kompozit eğme numunesinin optik mikroskop görüntüsü



Şekil.36. 90° doğrultusunda %0,2 CNT katkılı kompozit eğme numunesinin optik mikroskop görüntüsü

BÖLÜM 10

SONUÇ VE ÖNERİLER

Termoset kompozitlerde, MWCNT katkısının numunelerin mekanik özellikleri üzerine etkileri değerlendirilmiştir. Numunelerdeki en yüksek mukavemet, %0,2 MWCNT içeren, 90° yönündeki numunelerin eğme testinden elde edilmiştir. Bu oran %0,2 MWCNT içeren 0° yönündeki numune ile karşılaştırıldığında %18,5 oranında daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Eğme testi sonuçları, arayüzey gelişiminin iyileştiğini ifade etmektedir. Optik mikroskop görüntülerinde, tabakalar arası ayrışma (delaminasyon) problemleri, fiber, matriks kırıkları belirlenmiştir. Elyaf hacim oranı %0 MWCNT için, %35,8, %0,2 MWCNT için ise %38,3 olarak hesaplanmıştır. Ayrıca, kompozit malzeme içindeki porozite miktarının malzemenin mekanik özellikleri üzerine etkisini araştırmak için, porozite hesabı yapılarak her numune için bu oran bulunmuştur. CNT katkılı numunelerde porozite oranının daha az olması, arayüzey uyumunun iyileştiğini göstermektedir. Yakma testi numunelerinde yaklaşık, %1-1,8 arasında porozite hacmi hesaplanmıştır. Liu vd (2006), çalışmalarında, kompozit laminatların boşluk muhtevası ve mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmışlar ve %0'dan %3,5'e kadar çeşitli porozite içeriklerini tespit ederek, bu sonuçların hem dayanıklılık hem de modülün artan porozite ile azaldığını ifade etmişlerdir. Bu sonuç çekme modülü ve gerilmesindeki mekanik özellikleri etkilediğini ortaya çıkarmıştır. M. Mariatti vd (2015), Çok duvarlı karbon nanotüp katkılı epoksi kompozitlerin, ağırlıkça %0,4 MWCNT eklenmesinde gerilme mukavemetini ve gerilme modülünü arttırdığı sonucuna varmışlardır. Bu doğrultuda, CNT'siz kompozit malzeme ve CNT eklenmiş kompozit malzeme arasındaki çekme ve eğilme dayanım farkı, CNT katkısının malzemenin mukavemetini iyileştirdiğini göstermiştir. Özellikle, epoksi/elyaf/CNT katkılı kompozit numunelerin kalınlık değerleri, epoksi/ elyaf kompozit ile karşılaştırıldığında, daha az kalınlığa sahiptirler. Bu durum, bize CNT'li numunelerde arayüzey uyumunun iyileştiğini göstermiştir. Çalışmamız, cam elyaf takviyeleri ile termoset kompozitlerin eğme özelliklerinin, nano malzeme ile kumaş kaplanmasının spreyleme tekniği uygulayarak geliştirilebileceğini ortaya koymuştur.

KAYNAKLAR

- Al-Saleh, M.H., Abdelal, N. R., Irshidat, M. R., 2017. Utilizing vacuum bagging process to prepare carbon fiber/CNT-modified-epoxy composites with improved mechanical properties. *Polymer Plastics Technology and Engineering*, 57, 3.175-184. doi: 10.1080/03602559.2017.1315644.
- Ago, H., Uehara, N., Yoshihara, N., Tsuji, M., Yumura, M and Tomonaga, N., 2006. Gas analysis of the CVD process for high yield growth of carbon nanotubes over metal-supported catalysts, *Carbon*, 44. 2912-2918. doi: 10.1016/j.carbon.2006.05.049.
- Bethune, D. S., Kiang, C.H. , De Vries, M.S., Gorman, G., Savoy, R., Vazquez J. and Beyers, R., 1993. Cobalt-catalysed growth of carbon nanotubes with single-atomic-layer walls, *Nature*, 363. 605-607. doi: 10.1038/363605a0.
- Biron, M., 2004. Thermosets and composites, *Thermoset Processing*, Elsevier Science, 329-341, Amsterdam Netherlands.
- Bingöl, M., Çavdar, K. 2016. Farklı Takviye Malzemelerinin Kompozit Malzeme Mekanik Özelliklerinin İyileştirilmesine Etkisi. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, Cilt 21, Sayı 2. doi: 10.17482/uujfe.35051
- Böger, L., Sumfleth, J., Hedemann, H. and Schulte, K., 2010. Improvement of fatigue life by incorporation of nanoparticles in glass fibre Reinforced epoxy, *Composites: Part A* 41. 1419–1424.
- Brocks, T., Shiino, M.Y., Cioffi, M.O.H., Voorwald, H.J.C., and Caporalli, F. A., 2013. Experimental RTM manufacturing analysis of carbon/epoxy composites for aerospace application. *Materials Research*, 16,5. 1175-1182.
- Cassell, A. M. Raymakers, J.A. Kong, J. Dai, . H. J., 1999. Large scale CVD synthesis of single-walled carbon nanotubes, *The Journal of Physical Chemistry B*, 103, 3. 6484–6492. doi: 10.1021/jp990957s.
- Cheremisinoff, N. P., and Cheremisinoff, P. N., 1995. *Fiberglass Reinforced Plastics*. Pages 1-38. doi: 10.1016/B978-081551389-6.50003-9.
- Cheremisinoff, N. P., and Cheremisinoff, P. N., 1995. *Fiberglass Reinforced Plastics* chapter 2-Resins and properties description. Pages 39-65. doi: 10.1016/B978-081551389-6.50004-0.
- Chou T. W. And Li, C., 2003. Elastic moduli of multi-walled carbon nanotubes and the effect of Van Der Waals forces Vol. 63, Issue 11, *Composite Science Technology*. Pages 1517-1524. doi: 10.1016/S02663538(03)00072-1.
- Demircan, O., Ashibe, S., Kosui, T. and Nakai, A., 2015. Effect of various knitting techniques on mechanical properties of biaxial weft-knitted thermoplastic composites. *Journal of Thermoplas. Compos. Materials*. 28, 896-910 doi: 10.1177/0892705713519121.
- Enşici, A., 2004. Polimer esaslı kompozit malzemeler ve ürün tasarımında kullanımları raporu.

- H.Y. Ersoy, 2001. Kompozit Malzeme, Literatür Yayıncılık Dağıtım Pazarlama, San. Tic. Ltd. Şti. İSTANBUL.
- Fan, Z., Santare, M. H., Advani, S. G., 2007. Interlaminar shear strength of glass fiber reinforced epoxy composites enhanced with multi-walled carbon nanotubes. Vol. 39, Issue 3, March 2008, Pages 540-554 doi: 10.1016/j.compositesa.2007.11.013.
- Frank, S., Poncharal, P., Wang, Z. L., de Heer ,W.A., 1998. Carbon nanotube quantum resistors. Science, 280:1744–6.
- Gächter, R and Müller, H, 1987. Plastics Additives 2nd Edition, Hanser Publishers, Munich.
- Genç, Ç., Arıcı. A.A., 2008.Yat İmalatında Kullanılan CTP Malzeme ve İmalat Yöntemleri Bölüm III: İnfüzyon Yöntemi, Gemi ve Deniz Teknolojisi Dergisi, Sayı: 178, s.16-21.
- Gorbatikh, L., Godara, A., Kalinka, G., Warriar, A., Rochez O., Mezzo, L., Luizi, F., Vuure, A.W.V., Lomov, S.V., Verpoest, I., 2010. Interfacial shear strength of a glass fiber/epoxy bonding in composites modified with carbon nanotubes. Composite Science and Technology 70, 1346-1352.doi: 10.1016/j.compscitech.2010.04.010.
- Guo, Q, 2012. Thermosets structure, properties and application (İkinci baskı). Woodhead publishing in material,35-68,28,UK.
- Hirsch, A., 2002. Functionalization of Single-Walled Carbon Nanotubes. Angewandte Chemie International Edition., 41, No. 1.doi: 10.1002/1521-3773(20020603)
- İijima, S. and Ichihashi, T., 1993. Single-Shell Carbon Nanotubes of 1-nm Diameter. Nature, 363, 603-605.doi: 10.1038/363603a0.
- İijima, s., 1991. Helical microtubules of grraphitic carbon . Nature, 354,56-58. doi: 10.1038/354056a0.
- Iijima S., 2002. Carbon nanotubes: past, present, and future. Phys B. 323:1–5.
- Jonathan, N. C., Umar, K., Werner, J. B., Yurii, K.G., 2006. Small but strong: a review of the mechanical properties of carbon nanotube–polymer composites. Carbon, 44:1624–52.
- Kaushik, B.K. and Majumder, M.K. 2015. Carbon Nanotube Based VLSI Interconnects ,Springer briefs in applied sciences and technology, Pages 17-37. Doi:10.1007/978-81-322-2047-3_2.
- Kayaman-Apohan, N., Oktay, B., Türker, S., Karataş S. 2018.Multi-Walled Carbon Nanotube Reinforced Polyimide Composites. JOTCSA.5(1):283–294. doi: 10.18596/jotcsa.345015.
- Kim, J. K., Khan, S.U., Siddiqui, N. A. Ve Khan, S.U., 2013. Experimental torsional shear properties of carbon fiber reinforced epoxy composites containing carbon nanotubes, Composite Structures 104, 230–238. doi : 10.1016/j.compstruct.2013.04.033.
- Korkmaz, N., Çakmak, E., Dayık, M. 2016. Dokuma Karbon Elyaf Takviyeli Karbon Nano Tüp-Epoksi Kompozit Malzemelerin Mekanik ve Termal Karakterizasyonu. Süleyman Demirel Üniversitesi, Journal of natual and

applied sciences, Vol. 20, Issue 2, 338-353. Doi: 10.19113/sdufbed.44928

Küçükıldırım, B. O., Akdoğan, Eker, A. 2012. “Karbon Nanotüpler, Sentezleme Yöntemleri ve Kullanım Alanları,” TMMOB MMO Mühendis ve Makina Dergisi, cilt 53, sayı 630, s. 34-44.

Liu J, Jiang Z, Yu H, Tang T., 2011. Catalytic pyrolysis of polypropylene to synthesize carbon nanotubes and hydrogen through a two-stage process. Polym Degrad Stab. 96: 1711-1719.

Liu, L., Zhang, Bo-M., Wang, Dian-F., Wu, Zhang-J.2006. Effects of cure cycles on void content and mechanical properties of composite laminates.Elsevier, Composite Structures 73 (2006) 303–309.

Mariatti, M., Hamdan, S. ve Ervina, J. 2017. Mechanical, electrical and thermal properties of multiwalled carbon nanotubes/epoxy composites: effect of post-processing techniques and filler loading. *Springer*, 74:2513–2533. doi: 10.1007/s00289-016-1853-6.

Montazeri A, Javadpour J, Khavandi A, Tcharkhtchi A, Mohajeri A.,2010. Mechanical properties of multi-walled carbon nanotube/epoxy composites. Mater Design, Vol.31 Issue 9, 4202–4208. doi: 10.1016/j.matdes.2010.04.018.

Mintmire, J. W., White, C.T., 1995. Electronic and structural properties of carbon nanotubes. Carbon ,33:893–902.

Onat, A., 2015. Sakarya meslek yüksekokulu makina ve metal teknolojileri bölümü metalurji programı kompozit malzemeler ders notu. Sakarya.

Onaran, K., 2003. Malzeme Bilimi , Bilim Teknik Yayınevi.

Rafiee, R., 2013. Experimental and theoretical investigations on the failure of filament wound GRP pipes, Composites: Part B vol.4, Issue 1, 257–267. doi: 10.1016/j.compositesb.2012.04.009.

Ruoff, R. S., Qian, D., Liu, K. W.,2003. Mechanical properties of carbon nanotubes: theoretical predictions and experimental measurements. Published by Elsevier SAS, Comptes Rendus Physique 4, 993–1008.

Sankar, G. P. A., Udhaya, K. K.,2011. Mechanical and Electrical Properties of Single Walled Carbon Nanotubes: A Computational Study European Journal of Scientific, Vol.60. No.3, pp.342-358.

Sheikh-Ahmad, J.Y., 2009, Machining of polymer composites. Springer science business media, NY USA.doi: 10.1007/ 978-0-387-68619-6.

Sozer, E.M., Simacek, P. Advani, S.G., 2012. Manufacturing Techniques for Polymer Matrix Composites (PMCs) A volume in Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering, Pages 245–309. doi:10.1533/9780857096258.3.243.

Şahin, Y., 2006. Kompozit malzemelere giriş (2. Baskı),Seçkin yayıncılık, ANKARA.

Terrones M. 2003. Science and Technology of the Twenty-First Century: Synthesis, Properties, and Applications of Carbon nanotubes, Annu. Rev. Mater.Res. 33:419-501.

- Thostenson, E. T. and Chou, T. W., 2002. Aligned multi-walled carbon nanotube-reinforced composites: processing and mechanical characterization. *Journal of Physics D: Appl. Physics*. 35, No, 16. Pages, L77-L80 doi: 10.1088/0022-3727/35/16/103.
- Tüzemen, M., Salıncı, E., Avcı A., 2017. Enhancing mechanical properties of bolted carbon/epoxy nanocomposites with carbon nanotube, nanoclay, and hybrid loading. *Composite. Part B: Engineering*. 128, 146-154.
- Treacy, M. M. J., Ebbesen, T. W., Gibson, J.M., 1996. Exceptionally high Young's modulus observed for individual carbon nanotubes. *Nature* 1996;381:678–80.
- Ulcay, Y., AKYOL, M., ve Gemci, R., 2002. Polimer esaslı lif takviyeli kompozit malzemelerin arabirim mukavemeti üzerine farklı kür metotlarının etkisinin incelenmesi, *Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi*, Cilt 7, Sayı 1.
- Vasić, Z., Maksimović, S., Georgijević, D., 2018. Applied integrated design in composite UAV development. *Appl. Compos. Mater.* 25, 221–236. doi: 10.1007/s10443-017-9611-y.
- Yalçın H., ve Gürü M., 2002. *Malzeme Bilgisi*, Palme Yayıncılık. Ankara.
- Yu, M. F., Lourie, O., Dyer, M. J., Moloni, K., Kelly, T. F., Ruoff, R. S., 2000. Strength and breaking mechanism of multiwalled carbon nanotubes under tensile load. *Science*, 287:637–640.
- Fan, Z., Santare, M.H., Advani, S.G., 2007. Interlaminar shear strength of glass fiber reinforced epoxy composites enhanced with multi walled carbon nanotubes, *Composites Part A*, 39, 540–554. doi: 10.1016/j.compositesa.2007.11.013.
- Yu, M. F., Lourie, O., Dyer, M. J., Kelly, T.F., Ruoff, R.S., 2000. Strength and breaking mechanism of multiwalled carbon nanotubes under tensile load. *Science*, 287(5453), pp. 637-640.
- Zanjani, J.S.M., Okan, B.S., Menciloglu, Y.Z., Yıldız, M., 2016. Nano-engineered design and manufacturing of high-performance epoxy matrix composites with carbon fiber/selectively integrated graphene as multi-scale reinforcements. *RSC Advances*. 6, 9495-9506.
- Ziebro, J.I. Lukasiewicz, B. Grzmił, E. Borowiak-Palen, B. Michalkiewicz, 2009. Synthesis of nickel nanocapsules and carbon nanotubes via methane CVD. *Journal of Alloys and Compounds*. 485, 695-700.
- Zum, Gahr K.H. 1987. *Microstructure and Wear of Materials*. Elsevier, 314, Amsterdam.
- Xie, S., Li, W., Pan, Z., Chang, B., Sun, L., 2000. Mechanical and physical properties on carbon nanotube *J Phys Chem Solids*, 61 (7), pp. 1153-1158. doi: 10.1016/S0022-3697(99)00376-5.
- Wang, C. C., Chou and W.J., Chen, C.Y., 2008. Characteristics of polyimide-based nanocomposites containing plasma-modified multi-walled carbon nanotubes, *Composites Science and Technology*, 68(10-11), 2208-2213. doi:10.1016/j.compscitech.2008.04.008.

- Wang, C. H., Du, H. Y ., Tsai, Y. T., Chen, C. P., Huang, C.J., Chen, L.C., Chen, K.H., Shih, H. C.,2007. High performance of low electrocatalysts loading on CNT directly grown on carbon cloth for DMFC, Journal of Power Sources Vol. 171, Issue 1, Pages 55-62. doi: 10.1016/j.jpowsour.2006.12.028
- Wong, E. W., Sheehan, P.E. Lieber C.M., 1997. Nanobeam mechanics: elasticity, strength, and toughness of nanorods and nanotubes Science, vol. 277,Issue 5334, pp. 1971-1975. doi: 10.1126/science.277.5334.197



ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Pınar ÇOLAK
Uyruğu : T.C.
Doğum Yeri ve Tarihi : ANKARA/10.04.1986
E-mail : pnr.colak@windowslive.com

EĞİTİM

Derece	Adı, İlçe, İl	Bitirme Yılı
Lise	Bahçelievler Deneme Lisesi, Matematik-Fen, ANKARA	2003
Ön Lisans	Selçuk Üniversitesi Seydişehir MYO Makine programı, KONYA	2009
Lisans	Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Malzeme Bilimi ve Mühendisliği, SAMSUN	2015
Yüksek Lisans	Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Malzeme Bilimi ve Mühendisliği , SAMSUN	2018

SERTİFİKALAR

	Yıl
1. Autocad	2008
2. CNC Operatörlüğü	2008
3. Alaaddin Keykubat Üniversitesi Pedagojik formasyon eğitimi	2017

SEMPOZYUM

Adı	Şehir	Yıl
1. 2. Savunma Sanayi Sempozyumu	Kırıkkale	2017
2. ISLAC'2018	Karabük	2018
3. Proceedings of the 8 th World Conference on 3D Fabrics and Their Applications	Manchester/UK	2018

YAYINLAR

AL-DARKAZALİ, COLAK, P., A., KADIOĞLU, K., GÜNAYDIN, E., İNANÇ, İ. ve DEMİRCAN, Ö. Mechanical Properties of Thermoplastic and Thermoset Composites Reinforced with 3D Biaxial Warp-knitted Fabrics. (Yayınevine gönderildi)

COLAK, P., AKYÜZ, G. ve DEMİRCAN, Ö. (2017). Karbon nanotüp ilaveli cam fiber takviyeli kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinin araştırılması. 2. Savunma Sanayi Sempozyumu, 6-8 Nisan, Bildiri Özetleri Kitabı, 176, Kırıkkale, Türkiye.

COLAK, P., KADIOĞLU, K., GÜNAYDIN, E. ve DEMİRCAN, Ö. (2018). Effect of Integration of Carbon Nanotubes (CNTs) on Flexural Properties of Thermoset Composites. 1st International Symposium on Light Alloys and Composite Materials (ISLAC'18), March 22-24, Bildiri Özetleri Kitabı, 157, Karabük, Turkey.

GÜNAYDIN, E., KADIOĞLU, K., COLAK, P. ve DEMİRCAN, Ö. (2018). Effect of Integration of Carbon Nanotubes (CNTs) on Compression after Impact Properties of Thermoset Composites. 1st International Symposium on Light Alloys and Composite Materials (ISLAC'18), March 22-24, Bildiri Özetleri Kitabı, 176, Karabük, Turkey.

COLAK, P., A., KADIOĞLU, K., GÜNAYDIN, E., DEMİRCAN, Ö. (2018), Proceedings of the 8th World Conference on 3D Fabrics and Their Applications, 28-29 March, Bildiri Özetleri Kitabı, Manchester, UK.