



**T.C.
SİVAS CUMHURİYET ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**NANOPARTİKÜL TAKVİYELİ E-CAM LİFİ/EPOKSİ KOMPOZİT
MALZEME ÜRETİMİ VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN
BELİRLENMESİ**

DOKTORA TEZİ

**Sakine KIRATLI
(201292092002)**

**Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı
Tez Danışmanı: Prof. Dr. Züleyha ASLAN**

**SİVAS
EKİM 2018**

Sakine KIRATLI'nın hazırladığı ve “NANOPARTİKÜL TAKVİYELİ E-CAM LİFİ/EPOKSİ KOMPOZİT MALZEME ÜRETİMİ VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ” adlı bu çalışma aşağıdaki jüri tarafından MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI'nda DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı	Prof. Dr. Züleyha ASLAN Sivas Cumhuriyet Üniversitesi
Jüri Üyesi	Prof. Dr. Mehmet ŞİMŞİR Sivas Cumhuriyet Üniversitesi
Jüri Üyesi	Prof. Dr. Yeliz PEKBEY Ege Üniversitesi
Jüri Üyesi	Doç. Dr. Murat Yavuz SOLMAZ Fırat Üniversitesi
Jüri Üyesi	Dr. Öğr. Üyesi Ahmet AKKUŞ Sivas Cumhuriyet Üniversitesi

Bu tez, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından **DOKTORA TEZİ** olarak onaylanmıştır.

Prof. Dr. İsmail ÇELİK
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRÜ

Bu tez, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Senatosu'nun 20.08.2014 tarihli ve 7 sayılı kararı ile kabul edilen Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Tez Yazım Kılavuzu (Yönerge)'nda belirtilen kurallara uygun olarak hazırlanmıştır.




*Bu tez, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (CÜBAP) Komisyonu tarafından **M-599** nolu proje kapsamında desteklenmiştir.*



Bütün hakları saklıdır.
Kaynak göstermek koşuluyla alıntı ve gönderme yapılabilir.

© Sakine KIRATLI, 2018



Her zaman ve her koşulda yanımda olan anneme, babama ve kardeşime...

ETİK

Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Tez Yazım Kılavuzu (Yönerge)'nda belirtilen kurallara uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- ✓ Bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- ✓ Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- ✓ Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere, bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu ve atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- ✓ Bütün bilgilerin doğru ve tam olduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- ✓ Tezin herhangi bir bölümünü, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi veya bir başka üniversitede, bir başka tez çalışması olarak sunmadığımı; beyan ederim.

9.10.2018

Sakine KIRATLI

KATKI BELİRTME VE TEŞEKKÜR

Tez çalışmam boyunca büyük bir özveriyle bilgi ve deneyimlerini paylaşan danışman hocam Prof. Dr. Züleyha ASLAN'a;

Tez izleme komitemde yer alarak önerileriyle yol gösteren Prof. Dr. Mehmet ŞİMŞİR ve Dr. Öğr. Üyesi Ahmet AKKUŞ'a;

Laboratuvar imkânlarından yararlanmamı sağlayan Dr. Öğr. Üyesi Ümit Nazlı TEMEL ve Dr. Öğr. Üyesi Fatih DARICIK'a;

Taramalı elektron mikroskobu görüntülerinin hazırlanması ve değerlendirilmesinde katkı sağlayan Dr. Öğr. Üyesi Ali ÖZER'e;

Tez yazım aşamasında gösterdiği yardımlardan dolayı Arş. Gör. Lutuf ERTÜRK'e teşekkür ederim.

Büyük bir sabır ve anlayışla her konuda beni destekleyen canım aileme sonsuz sevgi ve saygılarımı sunarım.

ÖZET

NANOPARTİKÜL TAKVİYELİ E-CAM LİFİ/EPOKSİ KOMPOZİT MALZEME ÜRETİMİ VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ

Sakine KIRATLI

Doktora Tezi

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Züleyha ASLAN

2018, 114+xviii sayfa

Bu çalışmada nanopartikül takviyesinin E-cam lifi/epoksi tabakalı kompozit malzemenin mekanik özellikleri üzerine etkisi araştırılmıştır. Epoksi içerisine ağırlıkça % 0.1, 0.3 ve 0.5 oranlarında çok duvarlı karbon nanotüp ve ağırlıkça % 1, 3 ve 5 oranlarında nanokil eklenmiştir. Ayrıca farklı çap ve uzunluğa sahip olan üç karbon nanotüp incelenmiştir. Katkısız ve nanopartikül katkılı kompozit malzemelerin imalatı el yatırma ve vakum torbalama tekniği kullanılarak yapılmıştır. Üretilen malzemeler su jeti ile kesilerek test numuneleri elde edilmiştir. Nanopartikül katkılı ve katkısız kompozit malzemenin takviye doğrultusunda çekme mukavemeti, elastisite modülü, Poisson oranı ve takviyeye dik doğrultuda çekme mukavemeti, elastisite modülü bulunmuştur. Ayrıca kayma mukavemeti, esneklik mukavemeti ve tabakalar arası kayma mukavemeti incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin kayma mukavemeti, takviye doğrultusunda ve takviyeye dik doğrultuda çekme mukavemeti azalmıştır. Nanopartiküllü kompozitlerin takviye doğrultusunda elastisite modülü sadece bir oran için artmıştır (% 16.01). Poisson oranı (% 16.67) ve takviyeye dik doğrultuda elastisite modülü (% 33.25) ise artmıştır. Ayrıca karbon nanotüp içeren kompozit malzemelerin esneklik mukavemeti ve tabakalar arası kayma mukavemetinde sırasıyla % 34.75 ve 19.72 maksimum artış olmuştur. Hasarlı numunelerin kırılma yüzeyleri taramalı elektron mikroskopuyla incelenmiştir.

Anahtar kelimeler: E-cam lifi/epoksi, karbon nanotüp, nanokil, mekanik özellikler, tabakalı kompozit.

ABSTRACT

PRODUCTION OF NANOPARTICLE MODIFIED E-GLASS/EPOXY COMPOSITE MATERIAL AND DETERMINATION OF MECHANICAL PROPERTIES

Sakine KIRATLI

PhD Thesis

Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Züleyha ASLAN

2018, 114+xviii pages

In this study, the effect of nanoparticle reinforcement on the mechanical properties of E-glass/epoxy laminated composite material was investigated. Multi-walled carbon nanotubes at ratios of 0.1, 0.3 and 0.5 wt% and nanoclay at ratios of 1, 3 and 5 wt% were added to the epoxy. In addition, three carbon nanotubes with different diameters and lengths were studied. The production of neat and nanoparticle added composite materials was done by hand lay-up and vacuum bagging technique. The produced materials were cut with water jet and the test samples were obtained. The tensile strength, the elasticity modulus and Poisson's ratio in the reinforcement direction and the tensile strength, the elasticity modulus in the direction perpendicular to the reinforcement of the neat and nanoparticle modified composite materials were found. In addition, the shear strength, the flexural strength and the interlaminar shear strength were investigated. According to the results obtained, the shear strength, the longitudinal and transverse tensile strength of the nanoparticle modified composite materials decreased. The elasticity modulus in the reinforcement direction of the nanoparticle modified composites was increased for only one ratio (16.01%). Poisson ratio (16.67%) and the elasticity modulus (33.25%) in the direction perpendicular to the reinforcement were increased. In addition, the flexural strength and the interlaminar shear strength of the composite materials containing carbon nanotubes were increased in 34.75% and 19.72%, respectively. The fracture surfaces of the damaged samples were examined by scanning electron microscopy.

Key Words: E-glass/epoxy, carbon nanotube, nanoclay, mechanical properties, laminated composite.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	viii
ABSTRACT	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	xiii
TABLolar DİZİNİ	xvii
SİMGELER DİZİNİ	xviii
1. GİRİŞ	1
1.1 Nanopartikül Takviyeli Kompozit Malzemelerin Mekanik Özellikleri Üzerine Yapılan Araştırmalar	2
1.1.1 Karbon nanotüp takviyeli kompozit malzemeler üzerine yapılan çalışmalar ..	3
1.1.2 Karbon nanotüp dışındaki partiküller ile takviye edilen kompozit malzemeler üzerine yapılan çalışmalar	10
1.2 Tezin Amacı ve İçeriği	19
2. TABAKALI KOMPOZİT MALZEMELERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİ ..	21
3. MATERYAL ve TEST METODLARI	26
3.1 E-cam lifi/Epoksi Tabakalı Kompozit Malzemelerin İmalatı	26
3.2 Çekme Deneyi (ASTM D3039)	32
3.3 Kayma Deneyi (ASTM D5379)	35
3.4 Esneklik Deneyi (ASTM D790).....	36
3.5 Tabakalar Arası Kayma Mukavemeti Deneyi (ASTM D2344)	38
3.6 Kırılma Yüzeylerinin Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ile İncelenmesi.....	39
4. SONUÇLAR	40
4.1 Parametreler	40
4.2 Çekme Testleri	41
4.2.1 Takviye doğrultusunda çekme testleri.....	41
4.2.1.1 Katkisız E-cam lifi/epoksi tabakalı kompozit malzemenin takviye doğrultusunda çekme davranışı	41
4.2.1.2 KNT1 karbon nanotüp katkılı E-cam lifi/epoksi tabakalı kompozit malzemenin takviye doğrultusunda çekme davranışı.....	42
4.2.1.3 KNT2 karbon nanotüp katkılı E-cam lifi/epoksi tabakalı kompozit malzemenin takviye doğrultusunda çekme davranışı.....	44
4.2.1.4 KNT3 karbon nanotüp katkılı E-cam lifi/epoksi tabakalı kompozit malzemenin takviye doğrultusunda çekme davranışı.....	47
4.2.1.5 Nanokil katkılı E-cam lifi/epoksi tabakalı kompozit malzemenin takviye doğrultusunda çekme davranışı	50
4.2.1.6 Nanopartikül katkılı kompozit malzemelerin takviye doğrultusunda çekme mukavemetlerinin karşılaştırılması	52
4.2.1.7 Nanopartikül katkılı kompozit malzemelerin takviye doğrultusunda elastisite modüllerinin karşılaştırılması	53
4.2.1.8 Nanopartikül katkılı kompozit malzemelerin takviye doğrultusunda major Poisson oranlarının karşılaştırılması	54
4.2.2 Takviyeye dik doğrultuda çekme testleri	55
4.2.2.1 Katkisız E-cam lifi/epoksi tabakalı kompozit malzemenin takviyeye dik doğrultuda çekme davranışı.....	55

4.2.2.2 KNT1 karbon nanotüp katkılı E-cam lifi/epoksi tabakalı kompozit malzemenin takviyeye dik doğrultuda çekme davranışı	56
4.2.2.3 KNT2 karbon nanotüp katkılı E-cam lifi/epoksi tabakalı kompozit malzemenin takviyeye dik doğrultuda çekme davranışı	58
4.2.2.4 KNT3 karbon nanotüp katkılı E-cam lifi/epoksi tabakalı kompozit malzemenin takviyeye dik doğrultuda çekme davranışı	62
4.2.2.5 Nanokil katkılı E-cam lifi/epoksi tabakalı kompozit malzemenin takviyeye dik doğrultuda çekme davranışı	64
4.2.2.6 Nanopartikül katkılı kompozit malzemelerin takviyeye dik doğrultuda çekme mukavemetlerinin karşılaştırılması	66
4.2.2.7 Nanopartikül katkılı kompozit malzemelerin takviyeye dik doğrultuda elastisite modüllerinin karşılaştırılması	68
4.3 Iosipescue Düzlem İçi Kayma Testleri	69
4.3.1 Katkısız E-cam lifi/epoksi tabakalı kompozit malzemenin kayma davranışı	69
4.3.2 KNT1 karbon nanotüp katkılı E-cam lifi/epoksi tabakalı kompozit malzemenin kayma davranışı	70
4.3.3 KNT2 karbon nanotüp katkılı E-cam lifi/epoksi tabakalı kompozit malzemenin kayma davranışı	72
4.3.4 KNT3 karbon nanotüp katkılı E-cam lifi/epoksi tabakalı kompozit malzemenin kayma davranışı	74
4.3.5 Nanokil katkılı E-cam lifi/epoksi tabakalı kompozit malzemenin kayma davranışı	77
4.3.6 Nanopartikül katkılı kompozit malzemelerin kayma mukavemetlerinin karşılaştırılması	79
4.4 Üç Nokta Eğme Esneklik Testleri	81
4.4.1 Katkısız E-cam lifi/epoksi tabakalı kompozit malzemenin esneklik davranışı	81
4.4.2 KNT1 karbon nanotüp katkılı E-cam lifi/epoksi tabakalı kompozit malzemenin esneklik davranışı	82
4.4.3 KNT2 karbon nanotüp katkılı E-cam lifi/epoksi tabakalı kompozit malzemenin esneklik davranışı	84
4.4.4 KNT3 karbon nanotüp katkılı E-cam lifi/epoksi tabakalı kompozit malzemenin esneklik davranışı	87
4.4.5 Nanokil katkılı E-cam lifi/epoksi tabakalı kompozit malzemenin esneklik davranışı	89
4.4.6 Nanopartikül katkılı kompozit malzemelerin esneklik mukavemetlerinin karşılaştırılması	91
4.5 Tabakalar Arası Kayma Mukavemeti Testleri	93
4.5.1 Katkısız E-cam lifi/epoksi tabakalı kompozit malzemenin tabakalar arası kayma davranışı	93
4.5.2 KNT1 karbon nanotüp katkılı E-cam lifi/epoksi tabakalı kompozit malzemenin tabakalar arası kayma davranışı	94
4.5.3 KNT2 karbon nanotüp katkılı E-cam lifi/epoksi tabakalı kompozit malzemenin tabakalar arası kayma davranışı	96
4.5.4 KNT3 karbon nanotüp katkılı E-cam lifi/epoksi tabakalı kompozit malzemenin tabakalar arası kayma davranışı	99
4.5.5 Nanokil katkılı E-cam lifi/epoksi tabakalı kompozit malzemenin tabakalar arası kayma davranışı	101
4.5.6 Nanopartikül katkılı kompozit malzemelerin tabakalar arası kayma mukavemetlerinin karşılaştırılması	103

5. YORUMLAR ve ÖNERİLER 105

KAYNAKLAR 107

ÖZGEÇMİŞ



ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1 Tek yönlü takviyeli kompozit malzeme için eksenler	21
Şekil 2.2 a) Fiber doğrultusu b) Fibere dik doğrultuda çekme özelliklerinin belirlenmesi	23
Şekil 2.3 Basma aparatı	23
Şekil 2.4 a) Kayma aparatı b) Numunede <i>strain-gage</i> yerleşimi	24
Şekil 2.5 <i>Short beam shear</i> test düzeneği	25
Şekil 2.6 Üç nokta eğme test düzeneği	25
Şekil 3.1 Çok duvarlı karbon nanotüp ve karboksilik asit (COOH) ile karbon nanotüpün fonksiyonlaştırılması	26
Şekil 3.2 a) Epoksi-nanotüp karışımı b) Epoksi-nanokil karışımına manyetik karıştırıcı ile ön işlem yapılması	28
Şekil 3.3 Epoksi-nanopartikül karışımının buz banyosunda sonikatör ile karıştırılması	28
Şekil 3.4 Vakumlu ısı masası	29
Şekil 3.5 Kalıp ayırıcı ve T bağlantılı spiral hortumun yerleştirilmesi	29
Şekil 3.6 a) Katkısız b) Nanotüp c) Nanokil karışımının kumaşlara sürülmesi	30
Şekil 3.7 Soyma kumaşının yerleştirilmesi	31
Şekil 3.8 Delikli naylonun yerleştirilmesi	31
Şekil 3.9 Vakum battaniyesinin yerleştirilmesi	32
Şekil 3.10 Malzemenin vakum naylonu ile kapatılması ve oluşturulan vakum hattında pompa vasıtasıyla içerideki havanın alınması	32
Şekil 3.11 a) Takviye doğrultusu b) Takviyeye dik doğrultuda çekme numunesi	33
Şekil 3.12 Takviye doğrultusunda ve takviyeye dik doğrultuda çekme testinin yapılması	33
Şekil 3.13 V çentikli test numunesinin Iosipescu aparatına yerleştirilmesi ve basma yükü uygulanması	35
Şekil 3.14 V çentikli kayma numunesi	36
Şekil 3.15 Üç nokta eğme testinin yapılması	37
Şekil 3.16 Tabakalar arası kayma mukavemeti deneyinin yapılması	38
Şekil 3.17 a) Au-Pd kaplama ünitesi b) Taramalı elektron mikroskobu	39
Şekil 4.1 Katkısız kompozit malzemenin takviye doğrultusunda gerilme-birim şekil değiştirme grafiği	42
Şekil 4.2 Ağırlıkça farklı oranlardaki KNT1 katkılı kompozit malzemelerin takviye doğrultusunda gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri	44
Şekil 4.3 a) Katkısız b) KNT1 katkılı (% 0.1 oranı) kompozit malzeme için taramalı elektron mikroskobu görüntüleri	44
Şekil 4.4 Ağırlıkça farklı oranlardaki KNT2 katkılı kompozit malzemelerin takviye doğrultusunda gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri	46
Şekil 4.5 Katkısız b) KNT2 katkılı (% 0.3 oranı) kompozit malzeme için taramalı elektron mikroskobu görüntüleri	46
Şekil 4.6 KNT2 katkılı (% 0.3 oranı) kompozit malzeme için nanotüp dağılımını içeren taramalı elektron mikroskobu görüntüleri	47
Şekil 4.7 Ağırlıkça farklı oranlardaki KNT3 katkılı kompozit malzemelerin takviye doğrultusunda gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri	49
Şekil 4.8 a) Katkısız b) % 0.3 oranında KNT3 içeren kompozit malzeme için taramalı elektron mikroskobu görüntüleri	49

Şekil 4.9 Ağırlıkça farklı oranlardaki nanokil katkılı kompozit malzemelerin takviye doğrultusunda gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri	51
Şekil 4.10 a) Katkısız b) Nanokil katkılı (% 3 oranı) kompozit malzeme için taramalı elektron mikroskobu görüntüleri	52
Şekil 4.11 Katkısız ve nanopartikül katkılı kompozit malzemelerin takviye doğrultusunda gerilme birim şekil değiştirme grafikleri	53
Şekil 4.12 Katkısız ve nanopartikül katkılı kompozit malzemelerin takviye doğrultusunda çekme mukavemetlerinin karşılaştırılması	53
Şekil 4.13 Katkısız ve nanopartikül katkılı kompozit malzemelerin takviye doğrultusunda elastisite modüllerinin karşılaştırılması	54
Şekil 4.14 Katkısız ve nanopartikül katkılı kompozit malzemelerin takviye doğrultusunda Poisson oranlarının karşılaştırılması	55
Şekil 4.15 Katkısız kompozit malzemenin takviyeye dik doğrultuda gerilme-birim şekil değiştirme grafiği.....	56
Şekil 4.16 Ağırlıkça farklı oranlardaki KNT1 katkılı kompozit malzemelerin takviyeye dik doğrultuda gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri	58
Şekil 4.17 a) Katkısız b) % 0.3 oranında KNT1 içeren kompozit malzemeye ait taramalı elektron mikroskobu görüntüleri	58
Şekil 4.18 Ağırlıkça farklı oranlardaki KNT2 katkılı kompozit malzemelerin takviyeye dik doğrultuda gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri	60
Şekil 4.19 a) Katkısız b) % 0.3 oranında KNT2 içeren kompozit malzemeye ait taramalı elektron mikroskobu görüntüleri	60
Şekil 4.20 KNT2 katkılı kompozit malzemedeki nanopartikül dağılımı ve topaklanmalara ait taramalı elektron mikroskobu görüntüleri	61
Şekil 4.21 Ağırlıkça farklı oranlardaki KNT3 katkılı kompozit malzemelerin takviyeye dik doğrultuda gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri	63
Şekil 4.22 a) Katkısız b) KNT3 katkılı (% 0.1 oranı) kompozit malzemeye ait taramalı elektron mikroskobu görüntüleri	64
Şekil 4.23 KNT3 katkılı kompozit malzemenin nanopartikül dağılımı ve topaklanmaları gösteren taramalı elektron mikroskobu görüntüleri.....	64
Şekil 4.24 Ağırlıkça farklı oranlardaki nanokil katkılı kompozit malzemelerin takviyeye dik doğrultuda gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri	66
Şekil 4.25 Nanokil katkılı kompozit malzemeye ait taramalı elektron mikroskobu görüntüleri.....	66
Şekil 4.26 Katkısız ve nanopartikül katkılı kompozit malzemelerin takviyeye dik doğrultuda gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri.....	67
Şekil 4.27 Katkısız ve nanopartikül katkılı kompozit malzemelerin takviyeye dikdoğrultuda çekme mukavemetlerinin karşılaştırılması.....	68
Şekil 4.28 Katkısız ve nanopartikül katkılı kompozit malzemelerin takviyeye dik doğrultuda elastisite modüllerinin karşılaştırılması	69
Şekil 4.29 Katkısız kompozit malzemenin kuvvet-yer değiştirme grafiği	70
Şekil 4.30 Ağırlıkça farklı oranlardaki KNT1 katkılı kompozit malzemelerin kuvvet-yer değiştirme grafikleri.....	72
Şekil 4.31 a) Katkısız b) % 0.5 oranında KNT1 içeren kompozit malzemenin kırılma yüzeyine ait taramalı elektron mikroskobu görüntüleri.....	72
Şekil 4.32 Ağırlıkça farklı oranlardaki KNT2 katkılı kompozit malzemelerin kuvvet-yer değiştirme grafikleri.....	74
Şekil 4.33 KNT2 katkılı kompozit malzemenin (% 0.3 oranı) a) Kırılma yüzeyi b) Nanotüp dağılımını gösteren taramalı elektron mikroskobu görüntüleri .	74

Şekil 4.34 Ağırlıkça farklı oranlardaki KNT3 katkılı kompozit malzemelerin kuvvet-yer değiştirme grafikleri.....	76
Şekil 4.35 % 0.3 oranında KNT3 içeren kompozit malzemenin kırılma yüzeyine ait taramalı elektron mikroskobu görüntüleri	77
Şekil 4.36 Ağırlıkça farklı oranlardaki nanokil katkılı kompozit malzemelerin kuvvet-yer değiştirme grafikleri.....	79
Şekil 4.37 % 5 oranında nanokil içeren kompozit malzemenin kırılma yüzeyine ait taramalı elektron mikroskobu görüntüleri	79
Şekil 4.38 Katkısız ve nanopartikül katkılı kompozit malzemelerin kuvvet-yer değiştirme grafikleri.....	80
Şekil 4.39 Katkısız ve nanopartikül katkılı kompozit malzemelerin kayma mukavemetlerinin karşılaştırılması.....	80
Şekil 4.40 Katkısız kompozit malzemenin kuvvet-yer değiştirme grafiği	82
Şekil 4.41 Katkısız kompozit malzemenin kırılma yüzeylerine ait taramalı elektron mikroskobu görüntüleri.....	82
Şekil 4.42 Ağırlıkça farklı oranlardaki KNT1 katkılı kompozit malzemelerin kuvvet-yer değiştirme grafikleri.....	84
Şekil 4.43 % 0.1 oranında KNT1 içeren kompozit malzemenin a) Kırılma yüzeyi b) Nanopartikül dağılımını gösteren taramalı elektron mikroskobu görüntüleri	84
Şekil 4.44 Ağırlıkça farklı oranlardaki KNT2 katkılı kompozit malzemelerin kuvvet-yer değiştirme grafikleri.....	86
Şekil 4.45 KNT2 katkılı kompozit malzemenin (% 0.1 oranı) taramalı elektron mikroskobu görüntüleri.....	86
Şekil 4.46 Ağırlıkça farklı oranlardaki KNT3 katkılı kompozit malzemelerin kuvvet-yer değiştirme grafikleri.....	88
Şekil 4.47 % 0.3 oranında KNT3 içeren kompozit malzemenin kırılma yüzeyine ait taramalı elektron mikroskobu görüntüleri	89
Şekil 4.48 Ağırlıkça farklı oranlardaki nanokil katkılı kompozit malzemelerin kuvvet-yer değiştirme grafikleri.....	90
Şekil 4.49 Nanokil katkılı (% 1 oranı) kompozit malzemenin taramalı elektron mikroskobu görüntüleri.....	91
Şekil 4.50 Katkısız ve nanopartikül katkılı kompozit malzemelerin kuvvet-yer değiştirme grafikleri.....	92
Şekil 4.51 Katkısız ve nanopartikül katkılı kompozit malzemelerin esneklik mukavemetlerinin karşılaştırılması.....	92
Şekil 4.52 Katkısız kompozit malzemenin kuvvet-yer değiştirme grafiği	94
Şekil 4.53 Katkısız kompozit malzemenin kırılma yüzeyini içeren taramalı elektron mikroskobu görüntüsü	94
Şekil 4.54 Ağırlıkça farklı oranlardaki KNT1 katkılı kompozit malzemelerin kuvvet-yer değiştirme grafikleri.....	96
Şekil 4.55 % 0.1 oranında KNT1 içeren kompozit malzemenin kırılma yüzeyine ait taramalı elektron mikroskobu görüntüleri	96
Şekil 4.56 Ağırlıkça farklı oranlardaki KNT2 katkılı kompozit malzemelerin kuvvet-yer değiştirme grafikleri.....	98
Şekil 4.57 KNT2 katkılı kompozit malzemenin (% 0.1 oranı) boşlukları ve kırılma yüzeyini gösteren taramalı elektron mikroskobu görüntüleri	98
Şekil 4.58 Ağırlıkça farklı oranlardaki KNT3 katkılı kompozit malzemelerin kuvvet-yer değiştirme grafikleri.....	100
Şekil 4.59 % 0.5 oranında KNT3 içeren kompozit malzemenin kırılma yüzeyine ait taramalı elektron mikroskobu görüntüleri	101

Şekil 4.60 Ağırlıkça farklı oranlardaki nanokil katkılı kompozit malzemelerin kuvvet-yer değiştirme grafikleri.....	102
Şekil 4.61 Nanokil katkılı kompozit malzemenin (% 1 oranı) kırılma yüzeyine ait taramalı elektron mikroskobu görüntüleri	103
Şekil 4.62 Katkısız ve nanopartikül katkılı kompozit malzemelerin kuvvet-yer değiştirme grafikleri.....	104
Şekil 4.63 Katkısız ve nanopartikül katkılı kompozit malzemelerin tabakalar arası kayma mukavemetlerinin karşılaştırılması	104



TABLolar DİZİNİ

Sayfa

Tablo 3.1 Karbon nanotüplerin teknik özellikleri	27
Tablo 3.2 Nanokilin teknik özellikleri	27
Tablo 4.1 Mekanik testler ve kullanılan parametreler	41
Tablo 4.2 Katkısız kompozit malzemenin takviye doğrultusunda çekme özellikleri	41
Tablo 4.3 KNT1 katkılı kompozit malzemelerin takviye doğrultusunda çekme özellikleri	43
Tablo 4.4 KNT2 katkılı kompozit malzemelerin takviye doğrultusunda çekme özellikleri	45
Tablo 4.5 KNT3 katkılı kompozit malzemelerin takviye doğrultusunda çekme özellikleri	48
Tablo 4.6 Nanokil katkılı kompozit malzemelerin takviye doğrultusunda çekme özellikleri	51
Tablo 4.7 Katkısız kompozit malzemenin takviyeye dik doğrultuda çekme özellikleri	56
Tablo 4.8 KNT1 katkılı kompozit malzemelerin takviyeye dik doğrultuda çekme özellikleri	57
Tablo 4.9 KNT2 katkılı kompozit malzemelerin takviyeye dik doğrultuda çekme özellikleri	59
Tablo 4.10 KNT3 katkılı kompozit malzemelerin takviyeye dik doğrultuda çekme özellikleri	63
Tablo 4.11 Nanokil katkılı kompozit malzemelerin takviyeye dik doğrultuda çekme özellikleri	65
Tablo 4.12 Katkısız kompozit malzemenin kayma mukavemeti	70
Tablo 4.13 KNT1 katkılı kompozit malzemelerin kayma mukavemeti	71
Tablo 4.14 KNT2 katkılı kompozit malzemelerin kayma mukavemeti	73
Tablo 4.15 KNT3 katkılı kompozit malzemelerin kayma mukavemeti	76
Tablo 4.16 Nanokil katkılı kompozit malzemelerin kayma mukavemeti	78
Tablo 4.17 Katkısız kompozit malzemenin esneklik mukavemeti	81
Tablo 4.18 KNT1 katkılı kompozit malzemelerin esneklik mukavemeti	83
Tablo 4.19 KNT2 katkılı kompozit malzemelerin esneklik mukavemeti	85
Tablo 4.20 KNT3 katkılı kompozit malzemelerin esneklik mukavemeti	88
Tablo 4.21 Nanokil katkılı kompozit malzemelerin esneklik mukavemeti	90
Tablo 4.22 Katkısız kompozit malzemenin tabakalar arası kayma mukavemeti	93
Tablo 4.23 KNT1 katkılı kompozit malzemelerin tabakalar arası kayma mukavemeti	95
Tablo 4.24 KNT2 katkılı kompozit malzemelerin tabakalar arası kayma mukavemeti	97
Tablo 4.25 KNT3 katkılı kompozit malzemelerin tabakalar arası kayma mukavemeti	100
Tablo 4.26 Nanokil katkılı kompozit malzemelerin tabakalar arası kayma mukavemeti	102

SİMGELER DİZİNİ

A	Kesit alanı, mm ²
C_{ij}	Rijitlik matrisi
E	Elastisite modülü, GPa
G	Kayma modülü, GPa
L	İlk boy, mm
P_{max}	Maksimum yük, N
R	Test hızı, mm/dk
s	Mesnet silindirlere merkezleri arasındaki mesafe, mm
S	Kayma mukavemeti, MPa
S_{ij}	Esneklik matrisi
t	Numune kalınlığı, mm
w	Numune genişliği, mm
Z	Dış yüzdeki liflerin şekil değiştirme oranı, mm/mm/dk
ε	Birim şekil değiştirme
γ	Birim çarpılma açısı
δ	Uzama ya da kısalma miktarı, mm
ν	Poisson oranı
σ	Normal gerilme, MPa
σ_f	Esneklik mukavemeti, MPa
σ_{sbs}	Tabakalar arası kayma mukavemeti, MPa
σ_t	Çekme mukavemeti, MPa
τ	Kayma gerilmesi, MPa

1. GİRİŞ

Çok eski çağlardan beri uygulama alanı bulan kompozit malzemeler, günümüzde otomotiv, gemicilik ve havacılık sektörü başta olmak üzere çeşitli sektörlerde yoğun olarak kullanılmaktadır. 1900'li yıllarda malzemelerin tanımlanması ve sınıflandırılmasına yönelik çalışmaların netlik kazanmasıyla birlikte polimer matrisli kompozit malzemelerin günlük hayatta kullanımı artmıştır. Metaller, seramikler ve polimerler gibi geleneksel malzemelere kıyasla üstün özelliklere sahip olan tabakalı kompozit malzemeler özellikle yüksek dayanım ve düşük ağırlık gerektiren birçok alanda yer edinmiştir. Yüksek özgül mukavemet ve yüksek özgül rijitlik gibi temel özelliklerinin yanı sıra yorulmaya, korozyona, aşınmaya karşı direncinin yüksek olması ve elektrik, ısı iletkenliğinin düşük olması bu malzemelerin geniş bir yelpazede kullanılmasını sağlamaktadır. Ancak birçok avantajına rağmen tabakalı kompozit malzemelerde matris çatlağı ve tabakaların ayrışması (delaminasyon) gibi matris elemanın karakteristiğine bağlı hasarlar oluşabilmektedir.

Fiber ve matris gibi iki temel fazdan oluşan tabakalı kompozit malzemelerin bileşenleri farklı mekanik özelliklere sahiptir. Fiber fazı yük taşıyıcı olarak görev yapmaktadır. Matris fazı ise uygulanan yükün fiberlere iletilmesini sağlamaktadır. Ancak matrisin mukavemet ve rijitliği fibere göre oldukça zayıftır. Bu nedenle fiber doğrultusunda fiberin takviye edici özelliği nedeniyle dayanım yüksek iken, fibere dik doğrultuda yükü matris taşıdığından dayanım düşüktür. Bununla birlikte matris baskın mekanik özellikler (kayma, transvers ve interlaminar özellikler) her zaman fiber baskın olanlara göre (takviye doğrultusundaki mekanik özellikler) daha küçüktür ve bu özellik yüksek performanslı yapısal malzemeler olan tabakalı kompozitlerin uygulama olanağını sınırlamaktadır (Liu vd., 2014).

İleri kompozit malzemelerin ana sınırlamalarından biri, kat ara yüzlerindeki takviyesiz saf polimer bölgesi nedeniyle kalınlık yönündeki zayıf mekanik özellikleridir (Guzman de Villoria vd., 2016). Tabakalı kompozitlerde çatlak ya da malzeme kusurları nedeniyle interlaminar gerilme yığılması oluşabilir ve kalınlık yönünde takviyenin olmayışından dolayı bu kusurların ilerlemesi engellenemez. Bunun neticesinde tabakaların ayrılması yoluyla malzeme bütünlüğünün kaybedildiği bir hasar mekanizması olan delaminasyon oluşur (Abot ve Song, 2010). Fiber takviyeli polimer kompozitlerin potansiyel kullanımı,

zayıf düzlem dışı özellikleri ve buna bağlı olarak düşük delaminasyon direnci nedeniyle engellenir. Düşük delaminasyon direncine katkıda bulunan iki anahtar faktör, zayıf fiber/matris arayüzeyi ve çoğu polimer matrisin kırılma doğasıdır (Shan vd., 2013; Diez-Pascual vd., 2011).

Tabakalı kompozitler yüklemeye maruz kaldığında düzlem içi gerilme ve şekil değiştirmelerin dışında kalınlık boyunca da gerilme ve şekil değiştirme oluşur (Naghashpour ve Hoa, 2013). Bir kompozit malzemenin düzlem içi çekme özellikleri fiber davranışı ile tanımlanırken, basma ve interlaminar özellikleri matris reçinenin karakteristiğiyle tanımlanır (Zhou vd. 2012, 2014). Düzlem dışı yönde tabakalı kompozitlerin mekanik performansı düzlem içi yönden daha düşüktür. Zayıf düzlem dışı özellikleri matris baskın çatlaklara ve yetersiz gerilme transferine atfedilir (Li vd., 2014). Zayıf düzlem dışı özelliklerini iyileştirebilmek amacıyla çeşitli teknikler (*stitching*, *z-pinning* vb.) kullanılmaktadır. Ancak bu yöntemler düzlem içi özelliklerini azaltmaktadır. Bu nedenle son yıllarda matris içerisine nanopartikül takviyesi yapılmaktadır. Özellikle üstün mekanik özelliklere sahip olan karbon nanotüpler tercih edilmektedir (Bortz vd., 2011; Kobayashi ve Kitagawa, 2016; Shan vd; 2013).

1.1 Nanopartikül Takviyeli Kompozit Malzemelerin Mekanik Özellikleri Üzerine Yapılan Araştırmalar

Literatüre sunulan çalışmalarda araştırmacıların bazıları fiber kullanmaksızın matris içerisine çeşitli nanopartikülleri (nanotüp, nanografen, nanokil vb.) ilave ederek kompozit malzeme oluşturmuş ve mekanik özelliklerini incelemişlerdir (Bashar vd., 2014; Dong vd., 2011; Kharitonov vd., 2016; Mahrholz vd., 2009; Nam vd., 2014; Yasmin vd., 2006). Bazı araştırmacılar ise fiber (cam, karbon, aramid vb.) kullanarak nanopartikül takviyeli matris malzeme (epoksi, polyester, vinilester vb.) ile tabakalı kompozit malzeme oluşturmuşlardır. Çalışmalarda karıştırma yöntemi, nanopartikül tipi, karışım oranı vb. farklı parametrelerle üstün özelliklere sahip kompozit malzeme üretmeyi hedeflemişlerdir.

Literatür araştırması karbon nanotüp ve diğer nanopartikülleri içeren kompozit malzemeler olmak üzere iki başlık halinde verilmiştir.

1.1.1 Karbon nanotüp takviyeli kompozit malzemeler üzerine yapılan çalışmalar

Araştırmalarda tek, çift ve çok duvarlı karbon nanotüpler kullanılmakla birlikte farklı türden nanotüpler de incelenmiştir. Ayrıca nanotüpler üzerinde amino, karboksil gibi kimyasal fonksiyonlaştırma işlemi yapılarak özelliklerin artırılması yoluna gidilmiştir. Ashrafi vd., (2012) ağırlıkça % 1 oranında, iki farklı şekilde fonksiyonlaştırılmış (lazer ve ark) tek duvarlı karbon nanotüp kullanmışlardır. Tek duvarlı karbon nanotüplerin cam fiber takviyeli PEEK (poly ether ether ketone) tabakalı kompozit malzemelerin interlaminar kayma dayanımı, termal ve elektrik iletkenlikleri üzerine etkisini incelemişlerdir. Lazerle fonksiyonlaştırılma yapılan kompozitlerin interlaminar kayma dayanımının arttığını bulmuşlardır. Davis vd., (2011) karbon fiber/epoksi tabakalı kompozit malzemeye ağırlıkça % 0.2 ve 0.5 oranlarında amino fonksiyonlaştırılmış tek duvarlı karbon nanotüp ekleyerek çekme ve yorulma testleri yapmışlardır. Püskürtme tekniği kullanarak karbon nanotüp karışımını her bir kat kumaşın üzerine püskürtmüşlerdir. Çekme dayanımı ve rijitliği için maksimum artışı % 0.5 oranında elde etmişlerdir. Diez-Pascual vd., (2011) E-cam lifi/PEEK kompozitlere % 0.5 ve 1 oranlarında tek duvarlı karbon nanotüp eklemişlerdir. Çekme, eğilme, darbe ve elektrik iletkenliği özelliklerini araştırmışlardır. Ayrıca dinamik mekanik ve termal analiz de yapmışlardır. Karbon nanotüpleri iki farklı metotla (ark ve lazer) sentezlemişlerdir. Lazerle sentezlenmiş % 1 içerikli karbon nanotüplü kompozit malzemelerde eğilme ve çekme özellikleri daha yüksek çıkmıştır. Zhu vd., (2007) fonksiyonlaştırılmış tek duvarlı karbon nanotüp içeren E-cam lifi/vinilester kompozit malzemenin interlaminar kayma dayanımını incelemişlerdir. Ağırlıkça % 0.1 oranında dört tip fonksiyonlaştırılmış karbon nanotüp kullanmışlar ve interlaminar kayma özelliklerinin geliştiğini bulmuşlardır.

Inam vd., (2010) çapraz katlı karbon fiber/epoksi malzemeye ağırlıkça % 0.025, 0.05 ve 0.1 oranlarında amino ile modifiye edilmiş çift duvarlı karbon nanotüp eklemişlerdir. Üç nokta eğilme, Mod I kırılma tokluğu ve darbe testi yapmışlardır. Eğilme dayanımı % 0.025 ve eğilme modülü % 0.05 oranında maksimum özellikler göstermiştir.

Alnefaie vd., (2013) ağırlıkça % 0 ve 1 oranlarında çok duvarlı karbon nanotüp içeren yarı izotropik $[0/+45/-45/90]_s$ ve tek yönlü $[0]_8$ cam fiber/epoksi tabakalı kompozit malzemelerin eğilme ve titreşim özelliklerini araştırmışlardır. Ayrıca fiber kullanmaksızın epoksiye çok duvarlı karbon nanotüp ekleyerek de oluşturdukları kompozit malzemenin özelliklerini incelemişlerdir. Çalışmalarında yarı izotropik tabakalı kompozit malzemenin eğilme dayanımındaki gelişmenin tek yönlü malzemenin

yaklaşık 10 kat daha yüksek olduğunu bulmuşlardır. Aldousari (2016) ise % 0 ve 1 oranlarında çok duvarlı karbon nanotüp içeren cam fiber/epoksi tabakalı kompozit malzemelerin ve fibersiz epoksi/nanotüp karışımının düzlem içi kayma özelliklerini Iosipescu metoduyla belirlemiştir. Hem epoksi/nanotüp karışımının hem de tabakalı kompozit malzemenin kayma dayanımının ve modülünün arttığını bulmuştur.

Anand vd., (2013) çok duvarlı karbon nanotüp içeren kompozit malzemenin çekme ve basma özellikleri üzerine farklı termoplastik çözücülerin etkisini araştırmışlardır. Çok duvarlı karbon nanotüpün termoplastik çözücüye oranı 1:5 olacak şekilde karıştırmışlar, daha sonra çözücülerin mekanik karıştırma ile yok edilmesinin ardından epoksi eklemişler ve tabakalı kompozit malzemeleri üretmişlerdir. Bulunan sonuçlara göre, kontrol numunesi baz alındığında çekme mukavemeti ve modülü etkilenmezken, basma dayanımının tüm çözücüler için arttığını bulmuşlardır. Chen vd., (2009) çapraz katlı bazalt fiber/epoksi kompozit malzemelere hacimce % 0.25, 0.5 ve 1.5 oranlarında üç tür (fonksiyonlaştırılmamış, iki farklı şekilde fonksiyonlaştırılmış; o-CNTs ve PGE-CNTs) çok duvarlı karbon nanotüp eklemişlerdir. Hem epoksiye hem de bazalt/epoksi kompozit malzemelere fonksiyonlaştırılmış karbon nanotüp eklenmesinin elastik özellikleri (çekme dayanımı ve modülü) geliştirdiğini bulmuşlardır. Ayrıca teorik olarak da Halpin-Tsai modelini kullanarak nano-epoksi kompozit malzemeleri incelemişlerdir. Kısmi topaklanma nedeniyle deneysel sonuçlar teorik sonuçlardan daha düşük çıkmıştır.

Fernandez vd., (2013) tek yönlü cam fiber/epoksi kompozitlere % 0.1 ve 0.3 oranlarında amino fonksiyonlaştırılmış ve fonksiyonlaştırılmamış çok duvarlı karbon nanotüp eklemişler ve düzlem içi kayma davranışını araştırmışlardır. Şekil değiştirme ölçüm rozetleri kullanarak kayma şekil değiştirmesini ölçmüşlerdir. Reçine içine karbon nanotüp eklenmesinin fiber takviyeli kompozit malzemenin düzlem içi kayma davranışını değiştirmedini bulmuşlardır. Garg vd., (2015) E-cam lifi/epoksi kompozit malzemeye % 0.1 oranında çok duvarlı karbon nanotüp (saf ve amino fonksiyonlaştırılmış) eklemişlerdir. Çekme ve eğilme testleri yapmışlardır. Yapılan testler sonucunda reçinenin epoksit gruplarıyla amino fonksiyonlaştırılmış karbon nanotüp arasında yüksek çapraz bağlanmanın olmasından dolayı mekanik özelliklerin geliştiğini bulmuşlardır. Guo vd., (2017) ağırlıkça % 0.025, 0.05, 0.1, 0.25, 0.5 ve 0.6 oranlarında iki farklı şekilde fonksiyonlaştırılmış (*butyl glycidyl ether* ve amino) çok duvarlı karbon nanotüp kullanmışlardır. Nanotüp takviyeli karbon fiber/epoksi kompozit malzemenin

interlaminar kayma dayanımı ve elektriksel özelliklerini incelemişlerdir. Her iki tür nanotüp için % 0.25 içeriğine kadar interlaminar kayma dayanımı gelişme göstermiştir.

Jia vd., (2013) epoksi içine % 0.5 oranında dört farklı tür çok duvarlı karbon nanotüp ekleyerek (r-MWCNTs, c-MWCNTs, s-MWCNTs, SiO₂-MWCNTs) çekme dayanımı ve modülünü bulmuşlardır. Buradan buldukları sonuçlara göre en yüksek çekme özellikleri gösteren silika nanopartikül-karbon nanotüp hibrit karışımını ağırlıkça % 0, 0.25, 0.5, 0.75 ve 1 oranlarında kullanarak imal ettikleri cam fiber/epoksi tabakalı kompozit malzemelerin interlaminar kayma dayanımı ve çekme özelliklerini incelemişlerdir. İnterlaminar kayma dayanımı, çekme dayanımı ve modülü % 0.5 oranında maksimum özellikler göstermiştir. Young modülünü Halpin-Tsai modelini kullanarak teorik olarak da bulmuşlar ve karşılaştırma yapmışlardır. Jia vd., (2015) epoksi içerisine ağırlıkça % 0.5 oranında üç çeşit çok duvarlı karbon nanotüpü (saf, amino ve karboksilik asitle fonksiyonlaştırılmış) eklemişler ve karbon fiber/epoksi kompozit malzemenin çekme ve basma özelliklerini araştırmışlardır. Nanotüp takviyesinin basma modülünü artırırken, çekme modülüne pek bir etkisinin olmadığını bulmuşlardır. Özellikle amino fonksiyonlaştırılmış çok duvarlı nanotüp mükemmel arayüz yapışması nedeniyle en yüksek basma modülünü göstermiştir. Ayrıca çekme ve basma dayanımı da azalmıştır.

Khosravi ve Eslami-Farsani (2015) ağırlıkça % 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 ve 0.5 oranlarında fonksiyonlaştırılmış çok duvarlı karbon nanotüpü epoksiye eklemişler ve bazalt fiber/epoksi kompozit malzemeyi üretmişlerdir. Çekme, eğilme ve basma testleri yapmışlar ve çekme, eğilme ve basma dayanımında en yüksek değerleri ağırlıkça % 0.4 nanotüp oranında elde etmişlerdir. Daha yüksek oranlarda dağılım zorluğu ve karışımın viskozite artışı nedeniyle mekanik özellikler azalmıştır. Ayrıca teorik olarak Euler-Bernoulli kiriş teorisini kullanarak basma özelliklerini elde etmişlerdir. Teorik ve deneysel sonuçlar arasında iyi bir uyum sağlamışlardır. Kim vd., (2012) karbon fiber/epoksi kompozit malzemenin termal ve mekanik özellikleri üzerine çok duvarlı karbon nanotüp etkisini araştırmışlardır. Epoksi içerisine % 0.5 oranında fonksiyonlaştırılmamış ve silan ile fonksiyonlaştırılmış çok duvarlı karbon nanotüp eklemişlerdir. Çekme özelliklerinde matristen ziyade fiber takviyesi etkin olduğundan önemli bir gelişme gözlenmemiştir. Ancak fonksiyonlaştırılmış nanotüp içeren malzemede çekme dayanımı ve modülünün biraz yüksek olduğu görülmüştür.

Lili vd., (2008) beş farklı çok duvarlı karbon nanotüpün örgü cam fiber/epoksi kompozit malzemelerin interlaminar kayma dayanımı üzerine etkisini incelemişlerdir. İnterlaminar kayma dayanımında maksimum gelişme yüzey iyileştirmesi yapılmış karbon nanotüpte görülmüştür. Liu vd., (2014) sıcak pres yöntemiyle üretilen örgü cam fiber/fenolik kompozit malzemeye ağırlıkça % 1, 2, 3 ve 4 oranlarında çok duvarlı karbon nanotüp ekleyerek interlaminar kayma dayanımını ve tribolojik özelliklerini incelemişlerdir. İnterlaminar kayma dayanımı % 2 oranında optimum özellikler göstermiştir. Liu vd., (2017) karbon fiber/PPEK (poly(phthalazinone ether ketone)) kompozit malzemeye ağırlıkça % 1 oranında çok duvarlı karbon nanotüp ekleyerek interlaminar kayma dayanımını ve darbe tokluğunu incelemişlerdir. Yapılan test sonuçlarına göre hem interlaminar kayma dayanımı hem de darbe tokluğu artmıştır. Muthu ve Dendere (2014) optimum lif kütle oranını ve karbon nanotüp fonksiyonlaştırma zamanını incelemişlerdir. Lif kütle oranlarını % 24, 32, 40 ve fonksiyonlaştırma zamanını 6, 24, 48 saat olarak belirlemişlerdir. Çeşitli testler ve morfolojik analiz yaparak en uygun lif kütle içeriğini % 32 ve en uygun fonksiyonlaştırma zamanını 24 saat olarak bulmuşlardır. Sonra da bu optimum özellikleri kullanarak % 0.1, 0.5 ve 1 oranlarında fonksiyonlaştırılmış çok duvarlı karbon nanotüp içeren C-cam lifi/polyester kompozit malzemelerin çekme, eğilme ve kırılma tokluğu testlerini yapmışlardır. Çekme ve eğilme özellikleri maksimum gelişmeyi % 0.5 oranında göstermiştir.

Rahman vd., (2013) % 0.1, 0.2, 0.3 ve 0.4 oranlarında amino fonksiyonlaştırılmış çok duvarlı karbon nanotüp içeren E-cam lifi/epoksi kompozit malzemenin interlaminar kayma dayanımını ve çapraz bağlanma yoğunluğunu incelemişlerdir. % 0.3 oranında nanotüp içeren kompozit malzemenin çapraz bağlanma yoğunluğu ve interlaminar kayma dayanımında maksimum artış bulunmuştur. Morfolojik çalışmalar, amino grupların varlığının fiber ile matris arasında iyi bir yapışma sağladığını göstermiştir. Rahman vd., (2015) epoksi içerisine % 0.3 ve 0.4 oranlarında amino fonksiyonlaştırılmış çok duvarlı karbon nanotüp ekleyerek hem epoksinin hem de E-cam lifi/epoksi kompozit malzemenin çekme performansını araştırmışlardır. Ayrıca çekme özelliklerini tahmin etmek için Halpin-Tsai ve Cox-Krenchel mikro mekanik modellerini kullanmışlar ve deneysel sonuçlarla karşılaştırmışlardır. % 0.3 oranında epoksi ve E-cam lifi/epoksi kompozitlerin dayanım, modül ve tokluk özellikleri önemli gelişmeler göstermiştir.

Rao vd., (2015) ağırlıkça % 0.25, 0.5 ve 1 oranlarında hidroksit ve karboksilik asitle fonksiyonlaştırılmış ve fonksiyonlaştırılmamış çok duvarlı karbon nanotüp içeren

reçinenin çekme testlerini yapmışlardır. Buradan çıkan test sonuçlarına istinaden % 0.5 ve 1 oranlarında fonksiyonlaştırılmamış karbon nanotüp ve de % 0.25 oranında karboksilik asitle fonksiyonlaştırılmış karbon nanotüp takviyesiyle tabakalı kompozit malzeme üretmişler ve çekme, basma, kayma, eğilme özelliklerini ve interlaminar kayma dayanımını bulmuşlardır. Bulunan sonuçlara göre tüm özelliklerde belli ağırlık yüzdelerinde artışlar meydana gelmiştir. Salam vd., (2013) ağırlıkça % 0.1, 0.2, 0.3 ve 0.4 oranlarında karboksilik asitle fonksiyonlaştırılmış çok duvarlı karbon nanotüp içeren karbon fiber/epoksi kompozitlerin mekanik (çekme, eğilme özellikleri ve interlaminar kayma dayanımı) ve termal performanslarını araştırmışlardır. Çekme, eğilme özellikleri ve interlaminar kayma dayanımı % 0.3 oranına kadar lineer olarak artan bir eğilim gösterirken, % 0.4 oranında nanopartikül topaklanmasına bağlı olarak azalmıştır.

Shan vd., (2013) karboksilik asitle fonksiyonlaştırılmış çok duvarlı karbon nanotüp içeren karbon fiber/epoksi kompozitlerin Mod I, Mod II kırılma tokluğu, interlaminar kayma dayanımı, çekme ve eğilme özelliklerini incelemişlerdir. Bir püskürtme tekniği kullanarak karbon nanotüp-epoksi karışımını fiberlerin üzerine püskürtmüşlerdir ve incelenen mekanik özelliklerde artış meydana gelmiştir. Sharma ve Shukla (2014) epoksi içerisine ağırlıkça % 0.25, 0.5, 1 ve 1.5 oranlarında amino fonksiyonlaştırılmış çok duvarlı karbon nanotüp eklemişler ve el yatırma tekniğiyle karbon fiber/epoksi kompozitleri üretmişlerdir. İnterlaminar kayma dayanımı, çekme ve eğilme özelliklerini incelemişlerdir. Halpin-Tsai ve mikromekanik denklemlerin kombinasyonuyla Young modülünü teorik olarak bulmuşlardır. Teorik Young modülü deneyselden % 16 daha yüksek çıkmıştır. Çekme dayanımı, eğilme dayanımı ve interlaminar kayma dayanımı artmıştır. % 1.5 oranına kadar 1 ve 2 yönündeki elastisite modülleri ve kayma modülü artarken, Poisson oranı sabit kalmıştır.

Shen vd., (2009) örgü E-cam fiber/poliamid kompozitlerin mekanik ve termal özellikleri üzerine çok duvarlı karbon nanotüp (ağırlıkça % 0.5, 1, 2 ve 4 oranlarında) etkisini incelemişlerdir. Mekanik özellikler için çekme ve eğilme testleri yapmışlardır. Eğilme modülü % 1 ve eğilme dayanımı % 0.5 oranında artmıştır. Çekme dayanımı ve modülü ise % 4 nanotüp içeriğinde artmıştır. Shen vd., (2014) el yatırma tekniğiyle üretilen rami fiber/epoksi kompozitlere ağırlıkça % 0.2, 0.4 ve 0.6 oranlarında karboksilik asitle fonksiyonlaştırılmış çok duvarlı karbon nanotüp eklemişlerdir. Üç nokta eğilme, interlaminar kayma dayanımı, kırılma tokluğu ve Charpy darbe testleri yapmışlardır. Kırılma mekanizmalarını *Fourier transform infrared spectroscopy* ve *X-ray*

photoelectron spectroscopy teknikleriyle araştırmışlardır. İnterlaminar kayma dayanımı, eğilme dayanımı ve modülü % 0.6 nanotüp içeriğinde optimum özellikler göstermiştir. Shokrieh vd., (2014a) karbon fiber/epoksi tabakalı kompozitlerin mikro ve makro artık gerilmeleri üzerine çok duvarlı karbon nanotüp (ağırlıkça % 0.1, 0.5 ve 1) etkisini araştırmışlardır. Termal artık gerilmelerin bulunmasında enerji metodu ve klasik tabaka teorisini kullanmışlardır. Ayrıca tabakalı kompozitlerin termal uzama katsayısı ve Young modülünü deneysel olarak bulmuşlardır. Bulunan sonuçlara göre takviye doğrultusundaki Young modülü değişmezken, transvers Young modülü % 1 nanotüp içeriğinde maksimum özellikler göstermiştir. Shokrieh vd., (2014b) ağırlıkça % 0.05, 0.1, 0.3 ve 0.5 oranlarında çok duvarlı karbon nanotüp içeren cam fiber/polyester kompozitlerin çekme ve eğilme özelliklerini deneysel olarak incelemişlerdir. Mujika tarafından geliştirilen klasik kiriş teorisine dayalı yaklaşımı kullanarak basma modülünü teorik olarak bulmuşlardır. Teorik sonuçlar modülde önemli bir artış olduğunu göstermiştir. Ayrıca % 0.5 nanotüp oranını kullanarak nanopartikül dağılımı üzerine sonikasyon zamanının (15, 45, 135 dk) etkisini incelemişlerdir. 15 dk'lık sürenin nanopartikülü dağıtmadığını ve 135 dk'lık sürenin nanotüplere zarar verdiğini, 45 dk'nın ise ideal karıştırma zamanı olduğunu bulmuşlardır. Çekme dayanımı, elastisite modülü ve eğilme modülü % 0.3 ve eğilme dayanımı % 0.05 nanotüp içeriğinde en iyi özellikleri göstermiştir.

Taraghi vd., (2015) şerit halindeki cam fiberleri % 10, 20 ve 30 oranında matrise eklemiş ve optimizasyon çalışması yapmışlardır. Daha sonra ağırlıkça % 0.75, 1 ve 1.5 içeriğinde çok duvarlı karbon nanotüp ve % 20 optimum fiber oranını kullanarak cam fiber/polipropilen tabakalı kompozit malzemeyi üretmişler ve mekanik, termal ve viskoelastik özellikleri incelemişlerdir. % 1 nanotüp içeriğinde optimum çekme ve eğilme özelliklerini elde etmişlerdir. Vargas vd., (2015) ağırlıkça % 0, 0.05, 0.1 ve 0.2 oranlarında fonksiyonlaştırılmış çok duvarlı karbon nanotüp içeren karbon fiber/epoksi kompozitin düzlem içi kayma davranışını araştırmışlardır. Nanotüp takviyesi kayma modülünü çok az etkilerken, kayma dayanımında artış sağlamıştır. Ancak % 0.1'den daha fazla nanotüp eklenmesi mukavemeti olumsuz etkilemiştir. Taramalı elektron mikroskopu görüntülerinde düşük özelliklerde zayıf fiber-matris bağlanması ve yüksek özelliklerde güçlü fiber-matris yapışması görülmüştür.

Wang vd., (2013) karbon fiber/epoksi kompozit malzemeye ağırlıkça % 1, 2, 3 ve 4 oranlarında karboksilik asitle fonksiyonlaştırılmış çok duvarlı karbon nanotüp ilave ederek interlaminar kayma dayanımını ve eğilme özelliklerini incelemişlerdir.

İnterlaminar kayma dayanımı ve eğilme özellikleri için maksimum değerleri % 1 nanotüp oranında elde etmişlerdir. Ayrıca % 1 oranında karbon nanotüp içeren kompozit malzemenin interlaminar kayma dayanımı ve eğilme özellikleri üzerine nem absorpsiyon (damıtılmış ve tuzlu su) etkilerini çeşitli zaman aralıklarında (50, 150, 400 saat) incelemişlerdir. Test sonuçlarından nem absorpsiyonunun mekanik özellikleri olumsuz yönde etkilediğini bulmuşlardır. Zhang vd., (2013) % 1 oranında çok duvarlı karbon nanotüp içeren karbon fiber/epoksi kompozit malzemenin interlaminar kayma dayanımı, çekme dayanımı ve modülünü araştırmışlardır. Çekme özellikleri ve interlaminar kayma dayanımının arttığını bulmuşlardır. Taramalı elektron mikroskobu ile malzemenin mikroyapısını incelemişler ve nanotüplerin köprüleme yaparak mikro çatlakların etkisini azalttığını tespit etmişlerdir.

Davis vd., (2010) vakum destekli reçine transfer kalıplama yöntemi ile üretilen karbon fiber/epoksi tabakalı kompozitlere, ağırlıkça % 0.2, 0.3 ve 0.5 oranlarında fonksiyonlaştırılmış karbon nanotüp (XD-grade) eklemişlerdir. Püskürtme tekniği kullanarak karbon nanotüp karışımını her bir kat kumaşın üzerine püskürtmüşlerdir. Çekme testlerinin yanısıra çekme-çekme ve çekme-basma şeklinde yorulma testleri yapmışlardır. Çekme dayanımı ve modülü için optimum artışı % 0.5 oranında elde etmişlerdir. Ağırlıkça % 0.15, 0.3 ve 0.4 oranlarında amino fonksiyonlaştırılmış karbon nanotüp (XD-grade) içeren karbon fiber/epoksi kompozitlerin Hossain vd., (2014a) interlaminar kayma dayanımı ve termo-mekanik özelliklerini, Hossain vd., (2015b) eğilme ve çekme özelliklerini araştırmışlardır. Ağırlıkça % 0.3 oranında maksimum özellikleri elde etmişlerdir ve bu oran için taramalı elektron mikroskobu analizlerinde karbon nanotüp ve epoksi arasında daha iyi fiber-matris arayüz bağlanması olduğu görülmüştür. Ayrıca reçinenin epoksit gruplarıyla karbon nanotüpün fonksiyonel grupları arasında çapraz bağlanma gelişmiş ve bunun sonucunda interlaminar kayma dayanımı artmıştır.

Ye vd., (2011) % 0, 1, 2 ve 3 oranlarında nanotüp (halloysite) içeren karbon fiber/epoksi kompozit malzemenin termal (camsı geçiş sıcaklığı) ve mekanik (eğilme ve darbe) özelliklerini araştırmışlar ve eğilme dayanımı ve modülünün arttığını bulmuşlardır.

Yokozeki vd., (2007a) tek yönlü ve yarı izotropik karbon fiber/epoksi kompozit malzemenin özellikleri üzerine karbon nanotüp (cup-stacked) etkisini araştırmışlardır. Ağırlıkça % 0 ve 5 oranlarında nanotüp içeren tek yönlü kompozit malzemenin termal

uzama katsayısı, çekme özellikleri ve Mod I-II kırılma tokluğunu incelemiştir. Ağırlıkça % 0, 5 ve 10 oranlarında nanotüp içeren yarı izotropik kompozit malzemenin ise çekme, basma, eğilme ve darbe sonrası basma testlerini yapmışlardır. Tek yönlü kompozit malzemenin transvers yönünde rijitlik ve dayanımda çok az gelişme varken, takviye doğrultusundaki özelliklerde değişiklik olmamıştır. Yarı izotropik kompozit malzemenin ise çekme, basma, eğilme rijitliğinde önemsiz bir artış varken, çekme dayanımına etkisi bulunmamıştır. Basma ve eğilme dayanımında ise kayda değer bir gelişme olmamıştır. Yokozeki vd., (2007b) ağırlıkça % 0, 5 ve 12 oranlarında karbon nanotüp (cup-stacked) içeren karbon fiber/epoksi kompozit malzemenin termo-mekanik özellikleri ve matris çatlağı davranışını araştırmışlardır. Tek yönlü (0° ve 90°) numuneler kullanarak çekme dayanımı, rijitliği ve termal uzama katsayısını bulmuşlardır. 90° yönünde rijitlik ve dayanımda artış meydana gelmiştir. Ayrıca çapraz katlı numunelere çekme testi yaparak matris çatlağı davranışını incelemiştir. Elde edilen sonuçlara göre karbon nanotüp ihtiva eden kompozit malzemelerde matris çatlamasına karşı direncin arttığı görülmüştür.

Tarfaoui vd., (2016) % 0.5, 1, 2 ve 4 oranlarında karbon nanotüp içeren karbon fiber/epoksi kompozitin interlaminar kayma dayanımı ve farklı çekme (*open hole* ve *flatwise*) testlerini yapmışlardır. Deneysel sonuçlar % 2 oranında karbon nanotüp eklenmesiyle mekanik performansın arttığını göstermiştir. % 4 nanotüp içeriğinde ise nanokompozitlerin viskozitesi arttığından ve üretim işlemi sırasında oluşan hava kabarcıkları gözeneklilik oluşturduğundan mekanik özellikler azalmıştır.

Kulkarni vd., (2010) ANSYS sonlu elemanlar paket programı ile nümerik çalışma yaparak karbon nanotüp takviyeli tabakalı kompozitlerin elastik modülünü, kayma modülünü ve Poisson oranını bulmuşlardır. Ayrıca nanotakviyeli tabakalı kompozitin elastik modülünü belirlemek için deneysel çalışma yapmışlardır.

1.1.2 Karbon nanotüp dışındaki partiküller ile takviye edilen kompozit malzemeler üzerine yapılan çalışmalar

Yapılan araştırmaların bir kısmında ise nanokil, alümina, silika, silisyum karbür, bor nitrür, turmalin gibi partiküller matrise eklenerek üstün özelliklere sahip kompozit malzemeler üretilmeye çalışılmıştır. Agubra vd., (2013) epoksi içerisine ağırlıkça % 1, 2 ve 3 oranlarında montmorillonit nanokil ekleyerek E-cam lifi/epoksi kompozit malzemenin eğilme, basma ve viskoelastik özellikleri üzerine üç farklı kombinasyondaki

(ultrasonik sonikasyon + üç merdaneli öğütme, santrifüj karıştırma + üç merdaneli öğütme, manyetik karıştırma + üç merdaneli öğütme) karıştırma metotlarının etkisini araştırmışlardır. Buldukları sonuçlara göre, üç merdaneli öğütme + manyetik karıştırma ve üç merdaneli öğütme + santrifüj karıştırma yapılması durumunda eğilme ve basma özellikleri % 2 kil içeriğinde maksimum özellikler göstermiştir. Diğer yandan ultrasonik sonikasyon ile üç merdaneli öğütme işleminin kombinasyonu özellikleri olumsuz etkileyerek polimer ağını bozmuştur. Anbusagar vd., (2014) polyster reçineye ağırlıkça % 0, 2, 4 ve 6 oranlarında montmorillonit nanokil ilave ederek örgü cam fiber takviyeli tabakalı kompozitlerin eğilme, darbe, sertlik ve su absorpsiyon özelliklerini incelemişlerdir. Yaptıkları test sonuçlarına göre hem eğilme dayanımı hem de eğilme modülü % 4 oranında maksimum değere ulaşmıştır. Kompozit malzemelerin yapısını XRD (X-ray diffraction) ve taramalı elektron mikroskobu ile araştırmışlardır. Taramalı elektron mikroskobu görüntülerinde nanokil içerikli matris malzemenin fiberle yapışmasının geliştiği ortaya çıkmıştır.

Chandradass vd., (2008) vinilester reçineye ağırlıkça % 1, 3 ve 5 oranlarında montmorillonit nanokil ekleyerek E-cam fiber takviyeli polimer kompozitlerin interlaminar kayma dayanımını, çekme, esneklik, darbe ve titreşim özelliklerini incelemişlerdir. Tüm özelliklerde artış olmuştur ve maksimum iyileşme % 3 oranında gözlenmiştir. Karippal vd., (2011) epoksi içerisine ağırlıkça % 2, 3, 5 ve 6 oranlarında montmorillonit nanokil eklemişlerdir. El yatırma tekniğiyle üretilen cam fiber/epoksi/nanokil hibrit kompozitlerin interlaminar kayma dayanımını, mikro sertlik, çekme ve eğilme özelliklerini araştırmışlar ve camsı geçiş sıcaklığını incelemişlerdir. İncelenen özelliklerin tümü % 5 nanokil oranına kadar artmıştır. Ayrıca taramalı elektron mikroskobu ile kırılmış çekme yüzeylerini incelemişler ve nanokilin epoksi içerisinde homojen dağılarak matris ile fiber arasında daha iyi bir etkileşim sağladığını bulmuşlardır.

Tsai ve Wu (2008) % 2.5, 5 ve 7.5 oranlarında montmorillonit nanokil takviyesi yaparak E-cam lifi/epoksi kompozitlerin kırılma tokluğunu, düzlem içi kayma dayanımını, çekme ve eğilme özelliklerini incelemişlerdir. Nanokil oranı arttıkça çekme dayanımı fiber yönünde azalırken, fiberlere dik yönde artmıştır. Çekme modülü fiber yönünde % 5 ve fiberlere dik yönde % 7.5 oranında maksimum olmuştur. Eğilme dayanımında fiber yönünde önemli bir gelişme olmazken, fiberlere dik yönde % 7.5 oranında optimum özellikler elde edilmiş, düzlem içi kayma dayanımı ise % 7.5 oranına kadar artmıştır.

Mahesh vd., (2012) el yatırma tekniğiyle üretilen örgü cam fiber/vinilester kompozit malzemeye ağırlıkça % 2, 4, 6 ve 8 oranlarında montmorillonit nanokil ekleyerek mekanik (çekme, eğilme, interlaminar kayma, darbe ve yorulma dayanımı) ve termal özellikleri (camsı geçiş sıcaklığı) incelemiştir. % 4 oranında tüm özellikler maksimum gelişme göstermiştir. Zhou vd., (2012) epoksi içerisine ağırlıkça % 1, 2, 3 ve 4 oranlarında montmorillonit nanokil ekleyerek termal ve mekanik özellikleri incelemiştir. Optimum özellikleri % 2 nanokil oranında elde etmişlerdir. Bu sonuçlara dayanarak % 2 nanokil içeriğinde karbon fiber/epoksi kompozit malzemeyi vakum destekli reçine transfer kalıplama yöntemiyle üretmişler ve çekme, eğilme, yorulma testleri yapmışlardır. Yapılan testlerin sonucunda özelliklerin iyileştiğini bulmuşlardır. Ayrıca Weibull dağılım fonksiyonuyla kombine edilmiş lineer hasar modelini kompozit malzemenin (saf ve nanofazlı) statik hasar sürecini tanımlamak için kullanmışlardır. Gerilme-birim şekil değiştirme ilişkisini tanımlamak için hasar denklemi kurmuşlardır. Elde edilen sonuçlar test verileriyle Weibull dağılımının uyumlu olduğunu göstermiştir.

Aktas ve Altan (2010a) % 0, 1, 2 ve 4 oranlarında Cloisite Na⁺ nanokil içeren E-cam lifi/su bazlı epoksi tabakalı kompozitlerin interlaminar kayma dayanımı, eğilme rijitliği ve camsı geçiş sıcaklığını bulmuşlardır. Nanokil içeriğine bağlı olarak eğilme rijitliği artma eğilimi gösterirken, interlaminar kayma dayanımı azalmıştır. Kırılmış yüzeylerin mikroyapı gözlemleri, nanokilin homojen dağıldığını ve artan nanokil içeriğiyle matris ile liflerin daha iyi yapıştığını ortaya koymuştur. Aktas ve Altan (2010b) cam fiber takviyeli su bazlı epoksi kompozitlerin özellikleri üzerine Cloisite Na⁺ nanokil etkisini araştırmışlardır. Nanokili epoksiye ağırlıkça % 0.1, 0.2, 0.5, 1 ve 2 oranlarında ilave ederek interlaminar kayma dayanımını, eğilme dayanımını ve eğilme rijitliğini incelemiştir. Mekanik özelliklerin % 0.5 oranında optimum olduğunu bulmuşlardır. Ayrıca termo-gravimetrik analiz ile termal stabiliteyi araştırmışlar ve XRD ile nanokil dağılım durumuna bakmışlardır. Kırılma yüzeylerinin taramalı elektron mikroskobu görüntülerinde, artan nanokil içeriğiyle fiber-matris yapışmasının iyileştiğini gözlemlemiştir.

Bozkurt vd., (2007) epoksi içerisine % 1, 3, 6 ve 10 oranlarında modifiye edilmiş ve edilmemiş Na⁺ montmorillonit nanokil eklemiştir. El yatırma tekniği ile üretilen E-cam lifi/epoksi tabakalı kompozitlerin interlaminar kayma dayanımını, kırılma tokluğunu, çekme ve esneklik özelliklerini incelemiştir. Epoksiye nanokil eklenmesinin çekme dayanımı ve modülüne belirgin bir etkisi olmazken, eğilme

dayanımı ve modülü % 6 kil oranına kadar artmıştır. İnterlaminar kayma dayanımı ise azalmıştır ve bu azalma modifiye edilmiş nanokil eklendiğinde daha büyük çıkmıştır. Phonthammachai vd., (2011) Na⁺ montmorillonit nanokil içeren karbon fiber/epoksi kompozitlerin termal ve mekanik (çekme, eğilme ve kırılma tokluğu) özelliklerini incelemişlerdir. Kütleme sıcaklığının (180, 200, 230, 250 °C), yüzey fonksiyonlaştırmanın ve nanokil oranının (hacimce % 0.6, 1.5 ve 3) etkisine bakmışlar ve % 0.6 oranında yüzeyi fonksiyonlaştırılmış nanokil içeren kompozit malzemenin eğilme ve çekme modülünü maksimum bulmuşlardır.

Dorigato vd., (2011) ağırlıkça % 2 ve 5 oranlarında üç ayrı nanokil (Cloisite 30B, 25A, 15A) kullanarak ürettikleri nanokil/epoksi kompozitlerin çekme, darbe ve Mod I kırılma tokluğu testlerini yapmışlardır. Maksimum özellikleri % 5 oranında Cloisite 25A nanokilde elde etmişlerdir. Daha sonra bu kil tipi ve oranını kullanarak karbon fiber/epoksi/kil kompozit malzemeleri üretmişler ve çekme ile darbe davranışını araştırmışlardır. Test sonuçlarından çekme dayanımı ve modülünün minimum düzeyde arttığını bulmuşlardır. Kanny ve Mohan (2014) vakum destekli reçine transfer kalıplama tekniğini kullanarak ürettikleri örgü E-cam lifi/epoksi tabakalı kompozit malzemelere ağırlıkça % 1, 2, 3, 4 ve 5 oranlarında nanokil (Cloisite 30B) ekleyerek dinamik mekanik analiz ve çekme testi yapmışlardır. Çekme dayanımı tüm oranlar için artmakla birlikte % 3 oranında maksimum olmuştur. Çekme modülü ise kademeli olarak % 5 oranına kadar artmıştır. Pol ve Liaghat (2017) ağırlıkça % 1, 2, 3, 5 ve 7 oranlarında nanokil (Cloisite 30B) içeren örgü E-cam lifi/epoksi kompozit malzemenin çekme, eğilme ve zımba testlerini yapmışlardır. Çekme dayanımı % 7, çekme modülü % 3, eğilme dayanımı % 3 ve eğilme modülü % 5 oranında nanokil içeren kompozit malzeme için optimum özellikler göstermiştir.

Khashaba (2014) el yatırma tekniğiyle üretilen [0]₈ ve [0/+45/-45/90]_s oryantasyonuna sahip E-cam lifi/epoksi kompozit malzemelerin mekanik özellikleri (eğilme dayanımı ve modülü, kırılma tokluğu, serbest titreşim) üzerine alümina nanopartikülün etkisini araştırmıştır. Epoksi içerisine % 1.5 oranında alümina ekleyerek her iki oryantasyona sahip malzeme için eğilme dayanımını artırmıştır. Eğilme modülü ise yarı izotropik malzemede artarken, tek yönlü malzemede azalmıştır. Taramalı elektron mikroskobu incelemelerinde, epoksi matrise iyi dağılan alümina nanopartikülün alümina/matris arayüz bağlanma dayanımını geliştirdiğini bulmuştur.

Daud vd., (2009) ağırlıkça % 2.5, 5 ve 10 oranlarında modifiye edilmiş ve edilmemiş tabakalı silika içeren fibersiz nanokompozitlere farklı sıcaklıklarda çekme testi yapmışlardır. Optimizasyon sonuçlarına göre, modifiye edilmiş nanokil ve % 2.5 ve 5 oranlarını kullanarak örgü E-cam lifi/poliamid tabakalı kompozit malzemeleri üretmişlerdir. 20, 80 ve 120 °C sıcaklıkta eğilme, basma ve kayma özelliklerini kuru ve nemli koşullarda incelemişlerdir. % 5 silika oranında yüksek sıcaklıklarda hem eğilme hem de basma dayanımında artış olduğunu bulmuşlardır. Düzlem içi kayma özelliklerinin ise her iki oran için artan sıcaklıkla azaldığını tespit etmişlerdir. Kornmann vd., (2005) epoksi içine ağırlıkça % 10 oranında tabakalı silika eklemişler ve hem epoksi/silika hem de epoksi/cam fiber/silika kompozit malzemelerin mekanik (çekme ve eğilme), termal (camsı geçiş sıcaklığı) ve su absorpsiyon özelliklerini araştırmışlardır. Bulunan sonuçlara göre çekme dayanımı azalırken Young modülü, eğilme dayanımı ve eğilme modülü artmıştır.

Tsai vd., (2010) ağırlıkça % 5, 10, 15, 20 ve 40 oranlarında silika nanopartikül içeren silika/epoksi nanokompozit malzemelerin çekme, üç nokta eğilme ve Mod I kırılma tokluğu testlerini yapmışlardır. İki ayrı epoksi türü için özellikleri ayrı ayrı incelemişler ve özelliklerde artış olduğunu bulmuşlardır. Ayrıca ağırlıkça % 5, 10 ve 20 oranlarında silika içeren tek yönlü E-cam lifi/epoksi kompozit malzemelerin düzlem içi kayma dayanımını araştırmışlardır. Farklı fiber oryantasyonlarında (5°, 10°, 15°, 90°) ve % 20 silika içeren kompozit malzemenin basma dayanımını da incelemişlerdir. Düzlem içi kayma dayanımı % 10 içerikte maksimum iken, bu orandan sonra azalmıştır. Basma dayanımı da farklı oryantasyonlarda artış göstermiştir.

Chisholm vd., (2005) ağırlıkça % 1.5 ve 3 oranlarında mikro ve nano ölçekli silisyum karbürü epoksi içine karıştırarak testler yapmışlar ve optimum özelliklere sahip partikülü belirlemişlerdir. Nano partikül eklenmesinin mikro partiküle göre daha üstün özellikler gösterdiğini bulmuşlar ve nanopartikül takviyesi yaparak karbon/epoksi tabakalı kompozitleri üretmişler, daha sonra eğilme, çekme ve yorulma testleri yapmışlardır. % 1.5 silisyum karbür oranı için çekme ve eğilme özelliklerinin arttığını bulmuşlardır.

Kelkar vd., (2016) epoksiye ağırlıkça % 0.5 oranında bor nitrür nanopartikül dahil ederek E-cam lifi/epoksi tabakalı kompozit malzemeleri imal etmişlerdir. Bor nitrür nanopartikülü fiziksel ve kimyasal olarak iki ayrı şekilde fonksiyonlaştırarak bor nitrür nanopartiküllerin malzeme morfolojisi, mekanik özellikler ve termal iletkenlik üzerine

etkilerini incelemişlerdir. Test sonuçlarına göre hem fiziksel hem de kimyasal olarak yüzeyi fonksiyonlaştırılmış bor nitrür içeren tabakalı kompozit malzemelerin çekme özellikleri gelişme göstermiştir. Eğilme dayanımı tüm malzemelerde azalırken, eğilme modülü fonksiyonlaştırılmış malzemelerde artmıştır. Fiziksel olarak fonksiyonlaştırma yapılan malzemeler kimyasal olarak yapılanlara göre daha iyi performans göstermiştir.

Subagia vd., (2014) vakum destekli reçine transfer kalıplama yöntemiyle üretilen bazalt fiber/epoksi kompozit malzemelere turmalin nano partikül eklemiştir. Ağırlıkça % 0.5, 1 ve 2 (süfaktansız) ve % 1 (süfaktanlı) oranlarında turmalin kullanmışlardır. Ürettikleri kompozit malzemenin çekme ve eğilme özelliklerini incelemişler ve bu özelliklerin arttığını bulmuşlardır. En iyi sonuçlar % 1 (süfaktanlı) oranında tespit edilmiştir.

Ağırlıkça % 0.1, 0.5, 1 ve 2 oranlarında tungsten disülfür içeren karbon fiber/ PPS (poly(phenylene sulphide)) tabakalı kompozit malzemelerin Diez-Pascual ve Naffakh (2012) termal, mekanik ve tribolojik özelliklerini, Diez-Pascual ve Naffakh (2013) ise 25 ve 120 °C sıcaklıklarda termal ve mekanik (interlaminar kayma dayanımı, basma ve eğilme) davranışlarını araştırmışlardır. Çekme ve eğilme özellikleri kademeli olarak % 2 oranına kadar artmıştır. Ayrıca her iki sıcaklık için % 2 oranına kadar interlaminar kayma dayanımı, eğilme ve basma özelliklerinde gelişme olmuştur. Hasarlı numunelerden elde edilen taramalı elektron mikroskopu analizi sonuçlarından, homojen nanopartikül dağılımı ve güçlü polimer-nanopartikül arayüz etkileşimi olduğu görülmüştür. Ayrıca artan nanopartikül içeriğiyle interlaminar çatlak ve delaminasyonların miktarında önemli azalma olduğu ortaya çıkmıştır.

Bir kısım araştırmacı ise karbon nanofiber ve grafen nanoparçacıkların kompozit malzemenin mekanik özellikleri üzerine etkisini incelemişlerdir. Arai vd., (2011) tek yönlü karbon fiber prepreg tabakaların arasına karbon nanofiberden yapılan ara katları yerleştirerek interlaminar kayma dayanımını hem deneysel hem de nümerik olarak araştırmışlardır. Deneysel çalışmayı iki farklı testle (basma tipi interlaminar kayma testi ve çekme tipi kayma pim testi) yapmışlardır. Nümerik analizi ise her iki tip kayma testi için Tsai-Wu kriterini kullanarak ANSYS paket programı ile yapmışlardır. Bortz vd., (2011) nanofiber takviyeli $[0]_{20}$, $[0/90]_{12}$ ve $[+45/-45]_6$ karbon fiber/epoksi tabakalı kompozit malzemelerin interlaminar kayma dayanımlarını, çekme, basma, eğilme özelliklerini, Mod I kırılma tokluklarını ve camsı geçiş sıcaklıklarını incelemişlerdir. Elde ettikleri sonuçlara göre çekme, basma ve eğilme özellikleri artma eğilimi gösterirken,

interlaminar kayma dayanımı azalmıştır. Chen vd., (2011) karbon fiber/epoksi kompozit malzemelerin kat aralarına karbon nanofiber yerleştirerek mekanik özelliklerini (interlaminar kayma dayanımı ve eğilme özellikleri) ve elektrik özelliklerini araştırmışlardır. Karbon nanofiber takviyesinin tüm özelliklerde artışa neden olduğunu bulmuşlardır.

Hossain vd., (2013) E-cam lifi/polyester kompozit malzemenin termal özellikleri ve interlaminar kayma dayanımı üzerine karbon nanofiber etkisini değerlendirmişlerdir. Polyester reçineyi % 0.1, 0.2, 0.3 ve 0.4 oranlarında karbon nanofiber kullanarak modifiye etmişlerdir. İnterlaminar kayma dayanımı için maksimum artışı % 0.2 karbon nanofiber oranında elde etmişlerdir. Taramalı elektron ve optik mikroskop görüntüleri, karbon nanofiber varlığının fiber ve matris arasında daha iyi bir ara yüz bağlanması sağladığını göstermiştir. Taheri-Behrooz vd., (2016) karbon nanofiber (% 0.25 oranında) takviyeli E-cam lifi/epoksi kompozit malzemelerin düzlem dışı kayma özelliklerini (1-3 ve 2-3 düzlemleri) incelemişlerdir. Kesme hasarının karmaşık doğasından dolayı sonuçların geçerliliğini sağlamak için iki farklı kayma testi yapmışlardır. Hem kısa kiriş eğilme testi (1-3 düzlemi) hem de Iosipescu kayma testiyle (1-3 ve 2-3 düzlemi) kayma özelliklerini bulmuşlardır. Her iki düzlemde karbon nanofiber takviyeli kompozit malzemenin kayma dayanımı ve modülü artmıştır. Kısa kiriş eğilme testindeki sonuçlar Iosipescu kayma testine göre biraz daha yüksek çıkmıştır. Epoksi içerisine ağırlıkça % 1, 2 ve 3 oranlarında karbon nanofiber eklenerek Zhou vd., (2006a) termal ve mekanik analiz, Zhou vd., (2014b) çekme, yorulma ve kırılma tokluğu testlerini yapmışlardır. Bu analizler neticesinde optimum nanofiber oranını % 2 olarak bulmuşlardır. Daha sonra % 2 karbon nanofiber içeren karbon fiber/epoksi tabakalı kompozit malzemeyi üretmişlerdir. Zhou vd., (2006a) eğilme dayanımı ve modülünün arttığını bulmuşlardır. Zhou vd., (2014b) ise kompozit malzemenin interlaminar kayma dayanımı ile basma özelliklerini araştırmışlar ve tüm özelliklerde artış meydana geldiğini bulmuşlardır. Taramalı elektron mikroskobu görüntülerinde karbon nanofiberin köprü vazifesi yaparak çatlak açılmasını azalttığını ve bu nedenle mekanik özellikleri geliştirdiğini gözlemlemişlerdir.

Seretis vd., (2017) farklı yoğunlukta iki fiber kumaş ve iki farklı dizilim kullanarak grafen nanoparçacık takviyeli tabakalı kompozit malzemeleri üretmişlerdir. $[0^{\circ}/90^{\circ}/0^{\circ}/90^{\circ}]_T$ diziliminde ağırlıkça % 1 ile % 30 arasındaki oranlarda ve $[45^{\circ}/0^{\circ}/0^{\circ}/-45^{\circ}]_T$ diziliminde % 1 ile % 20 arasındaki oranlarda grafen nanoparçacık kullanmışlardır. E-cam lifi/epoksi

kompozit malzemenin üç nokta eğilme ve çekme performansını araştırmışlardır. Her iki kumaş tipi için eğilme dayanımı % 5 oranına kadar artmıştır. $[0^{\circ}/90^{\circ}/0^{\circ}/90^{\circ}]_T$ diziliminde eğilme dayanımı % 20 ve çekme dayanımı % 5 oranında; $[45^{\circ}/0^{\circ}/0^{\circ}/-45^{\circ}]_T$ diziliminde ise eğilme dayanımı % 15 ve çekme dayanımı % 20 oranında maksimum performans göstermiştir. Seretis vd., (2018) grafen nanoparçacık takviyeli E-cam lifi/epoksi kompozit malzemelerin mekanik (çekme ve eğilme) ve termal özellikleri üzerine post-kür koşullarının (zaman ve sıcaklık) etkisini araştırmışlardır. Post-kür zamanını 4, 8, 18 saat ve sıcaklığını 50, 80, 100, 120 °C olarak belirlemişlerdir. Nanokompozit malzemelerin en iyi mekanik performansını ya düşük sıcaklık-fazla zaman ya da yüksek sıcaklık-az zamanla bulmuşlardır. Shen vd., (2013) epoksi içine ağırlıkça % 0.25, 0.5, 1 ve 1.5 oranlarında grafen nanoparçacık ekleyerek nanokompozit malzemenin çekme ve eğilme özelliklerini araştırmışlardır. Yapılan testlerde çekme ve eğilme dayanımı % 0.25 grafen nanoparçacık içeriğinde maksimum gelişme göstermiştir. Bu sonuç baz alınarak % 0.25 oranında grafen nanoparçacık içeren karbon fiber/epoksi tabakalı kompozit malzemeyi üretmişler ve çekme yorulmasını araştırmışlardır.

Bazı araştırmalarda da iki farklı partikül matrise eklenerek hibrit takviye durumunda özellikler araştırılmıştır. Aurilia vd., (2011) polipropilen matris içine hem nanokil (modifiye edilmiş tabakalı silika) hem de kalsiyum karbonat eklemiştirler. Nanokili % 3, 5, 7 ve kalsiyum karbonatı % 15, 22, 40, 50 oranlarında kullanmışlardır. Bu partikülleri ayrı ayrı incelemekle birlikte, iki partikülü belli yüzdelerde karıştırarak kombine karışım için de araştırmışlardır. İlk olarak fibersiz yapılan üretimle çekme testi yaparak Young modülünü bulmuşlardır. Buradan çıkan sonuca göre % 7 nanokil ve % 15 kalsiyum karbonat oranını kombine yükleme için kullanmışlardır. Cam fiber ve nanokil-kalsiyum karbonat takviyeli polipropilen kompozit malzemelerin eğilme ve interlaminar kayma testlerini yapmışlardır. Eğilme dayanımı, modülü ve interlaminar kayma dayanımı için en yüksek artışlar kombine yüklemede meydana gelmiştir. Islam vd., (2015) karbon fiber/epoksi kompozit malzemeye % 2 montmorillonit nanokil ve % 0.3 karboksilik asitle fonksiyonlaştırılmış çok duvarlı karbon nanotüp ekleyerek üç nokta eğilme ve düşük hızlı darbe testi yapmışlardır. Ayrıca dinamik mekanik analiz yaparak, camsı geçiş sıcaklığı ve çeşitli modül değerlerini bulmuşlardır. Nanopartikül takviyesi karbon fiber/epoksi kompozit malzemelerin mekanik ve termo-mekanik özelliklerini önemli ölçüde geliştirmiştir. Eğilme özellikleri hem kil hem de nanotüp takviyeli kompozitler için artmıştır, ancak kilde daha yüksek çıkmıştır.

Jagannathan vd., (2015) E-cam fiber/epoksi kompozit malzemelerin mekanik özellikleri üzerine mikro kauçuk ve nano silika partiküllerin etkisini araştırmışlardır. Epoksi içerisine ağırlıkça % 9 kauçuk mikropartikülü ve % 10 silika nanopartikülü ilave etmişlerdir. İnterlaminar kayma dayanımı, çekme, basma ve eğilme özelliklerini incelemişlerdir. Testleri hem oda sıcaklığında hem de 70 °C sıcaklık ve % 85'den fazla bağıl nem içeren koşullarda yapmışlardır. Her iki sıcaklık koşulu için çekme dayanımı artarken, çekme modülü azalmıştır ve basma özellikleri etkilenmemiştir. Eğilme özellikleri ve interlaminar kayma dayanımı ise azalmıştır. Kandare vd., (2015) epoksi içine grafen nanoparçacık, gümüş nanopartikül ve gümüş nanotel eklemişlerdir. Karbon fiber/epoksi tabakalı kompozit malzemenin termal, elektrik iletkenliği ve mekanik özellikleri (çekme, eğilme ve basma) üzerine bu partiküllerin etkisini araştırmışlardır. Bu üç nanopartikülü epoksi içine ayrı ayrı eklemekle birlikte ikili kombinasyonlarda da (grafen nanoparçacık/gümüş nanopartikül ve grafen nanoparçacık/gümüş nanotel) hazırlamışlardır. Çekme dayanımı gümüş nanotel ve çekme modülü gümüş nanopartikül içeren kompozit malzemede artmıştır. Basma dayanımı grafen nanoparçacık/gümüş nanotel kombinasyonu ve basma modülü gümüş nanopartikül içeren kompozit malzeme için artmıştır. Eğilme dayanımı hem grafen nanoparçacık hem de gümüş nanopartikül için artarken, eğilme modülü ise tüm nanopartiküllerde gelişme göstermiştir.

Kobayashi ve Kitagawa (2016) reçineye % 5 ve 10 oranlarında alümina ve silikon kauçuk ilave ederek örgü karbon fiber/vinilester kompozit malzemenin Mod I-II kırılma tokluğunu, çekme ve eğilme özelliklerini incelemişlerdir. Hem alümina hem de kauçuk içeren kompozit malzemenin çekme dayanımı % 5 oranında ve çekme modülü % 10 oranında artmıştır. Eğilme özellikleri, sadece alümina içeren malzemede % 10 ve kauçuk içeren malzemede ise % 5 oranında optimum olarak bulunmuştur. Li vd., (2014) karbon nanotüp ve alümina partikülleri ağırlıkça % 0.5 oranında epoksi içerisine ilave etmişler ve örgü cam fiber/epoksi kompozit malzemelerin mekanik (interlaminar kayma dayanımı ve eğilme) ve termo-mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Ayrıca sadece karbon nanotüp ekleyerek de hibrit takviyeyle özellikleri karşılaştırmışlardır. Kompozit malzemeye hibrit takviye yapılması durumunda hem eğilme özellikleri hem de interlaminar kayma dayanımı daha fazla artmıştır. Meguid ve Sun (2004) epoksi içine ağırlıkça % 1.5, 5, 7.5, 10, 12.5 ve 15 oranlarında ayrı ayrı tek duvarlı karbon nanotüp ve alümina ekleyerek, karbon fiber/epoksi tabakalı kompozit malzemelerin çekme ve kayma özelliklerini

incelemişlerdir. Düşük oranlarda nanopartikül takviyesi özelliklerde artışa neden olmuştur.

Tüzemen vd., (2017) ağırlıkça % 4 oranında nanokil, % 0.3 oranında karbon nanotüp ve hibrit (% 4 nanokil ve % 0.3 nanotüp) takviyeli karbon/epoksi tabakalı kompozit malzemelerin mekanik özelliklerini araştırmışlardır. Üç nokta eğilme ve çekme testi yapmışlardır. Ayrıca aksenal çekme yükü altında cıvata bağlantılı nanokompozit numunelerin davranışlarını incelemişlerdir. Eğilme dayanımı karbon nanotüp, eğilme modülü hibrit, çekme dayanımı hibrit ve çekme modülü karbon nanotüp takviyeli kompozit malzemede en yüksek değerine ulaşmıştır. Cıvata bağlantılı numunelerin yatak mukavemetinde maksimum artış nanokil içeriğinde görülmüştür. Ulus vd., (2015) karbon fiber/epoksi kompozit malzemeye boron nitrit nanopartikül (% 0.5), karbon nanotüp (% 0.3) ve bunların bileşimini (% 0.3 karbon nanotüp - % 0.5 boron nitrit) eklemiştir. Çekme, eğilme ve kayma özelliklerini incelemişlerdir. Özelliklerde en yüksek değerleri karbon nanotüp-boron nitrit hibrit numunelerde elde etmişlerdir. Wang vd., (2015) epoksi içerisine 10:0, 9:1, 7:3, 5:5, 3:7, 1:9, 0:10 karışım oranlarında çok duvarlı karbon nanotüp/grafen nanoparçacık ekleyerek çekme ve eğilme özelliklerini belirlemişlerdir. Optimum karışım oranını 1:9 olarak bulmuşlardır. Bu karışım oranını kullanarak % 0.5, 1 ve 1.5 içeriklerinde hibrit nanopartikül içeren karbon fiber/epoksi kompozit malzemelerin eğilme dayanımını, eğilme modülünü, interlaminar kayma dayanımını ve Mod I kırılma tokluğunu araştırmışlardır. Eğilme ve interlaminar kayma dayanımı % 1, eğilme modülü ise % 1.5 oranında optimum özellikler göstermiştir.

1.2 Tezin Amacı ve İçeriği

Yapılan literatür araştırmasında farklı özelliklere sahip nanopartiküller kullanılarak kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinin iyileştirilmesine ilişkin çalışmaların son yıllarda arttığı görülmüştür. Araştırmaların büyük bir kısmı çekme ve eğilme özelliklerinin incelenmesine yöneliktir. Ancak çekme özellikleri sadece takviye doğrultusunda incelenmiş olup, takviyeye dik doğrultuda çekme dayanımı ve elastisite modülünün bulunmasına ilişkin çok az çalışma yapılmıştır. Poisson oranının bulunmasına yönelik ise neredeyse hiçbir çalışma yapılmamıştır. Literatürde nanopartikül takviyesinin tabakalar arası kayma mukavemetine etkisi üzerine ise sınırlı sayıda araştırma bulunmuştur. Ayrıca az sayıda araştırmacı tarafından kayma özellikleri incelenmekle birlikte çalışmalarda genellikle ± 45 oryantasyonuna sahip numunelerin çekme testi

yapılarak kayma mukavemeti tespit edilmiştir. V çentikli numuneler kullanarak yapılan Iosipescu kayma test metodu ile nanopartikül takviyeli kompozitlerin kayma mukavemetinin belirlenmesi üzerine yapılan çalışmalar yok denecek kadar azdır. Ayrıca yapılan çalışmalarda nanopartikül oranı, fonksiyonlaştırma, karıştırma yöntemi, farklı fiber ve matrislerin kullanılması gibi etkenlerden dolayı mekanik özelliklerin değişimine yönelik bulunan sonuçlar birbirinden farklılık arz etmektedir. Bu nedenle araştırmalar halen devam etmektedir.

Bu tez çalışmasında nanopartikül takviyeli ve takviyesiz tek yönlü E-cam lifi/epoksi tabakalı kompozit malzeme el yatırma ve vakum torbalama yöntemiyle imal edilmiştir. Nanopartikül olarak montmorillonit nanokil (ağırlıkça % 1, 3, 5 oranlarında) ve karboksilik asitle fonksiyonlaştırılmış üç farklı tip çok duvarlı karbon nanotüp (ağırlıkça % 0.1, 0.3, 0.5 oranlarında) kullanılmıştır. Nanopartikül tipi, boyutu ve oranının kompozit malzemenin mekanik özellikleri (çekme, kayma, eğilme ve interlaminar özellikler) üzerine etkisi araştırılmıştır. Bu çalışmanın özgün yanı farklı boyutlardaki karbon nanotüplerin kullanılmasıdır. Epoksi matrise nanopartikül takviyesi yapılarak kompozit malzemenin takviye doğrultusu ve takviyeye dik doğrultuda çekme mukavemeti, elastisite modülü, Poisson oranı, düzlem içi kayma mukavemeti, esneklik mukavemeti ve interlaminar kayma mukavemeti artırılmaya çalışılmıştır. Hasarlı numunelerin kırılma yüzeyleri taramalı elektron mikroskobu ile incelenmiş ve nanopartikül takviyesinin kompozit malzemenin hasar mekanizmaları üzerine etkisi değerlendirilmiştir.

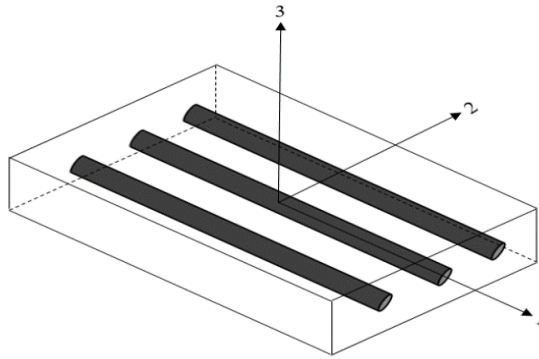
2. TABAKALI KOMPOZİT MALZEMELERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİ

Kompozit malzemelerin doğası metallere farklılık göstermektedir. Metaller, özellikleri doğrultuya bağlı olarak değişmediğinden izotropik davranış sergilemektedir. Tabakalı kompozitler ise çok daha karmaşık bir yapıya sahip olduklarından, üç doğrultuda birbirinden bağımsız ve farklı özellik içeren ortotropik özellik göstermektedir. Ortotropik malzemelerde üç boyutlu gerilme-şekil değiştirme bağıntısı, genelleştirilmiş Hooke kanunu ile verilmektedir (Denklem 2.1). Bu bağıntının açık gösterimi Denklem 2.2 ile tanımlanmaktadır (Jones, 1975).

$$\sigma_i = C_{ij} \cdot \varepsilon_j \quad (i, j = 1, 2, 3) \quad [2.1]$$

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} \quad [2.2]$$

Denklem 2.1’de verilen C_{ij} rijitlik matrisi, σ_i gerilme tansörü ve ε_j şekil değiştirme tansörünü göstermektedir. Alt indislerde belirtilen 1, 2, 3 rakamları koordinat sisteminin eksenlerini belirtmektedir (Şekil 2.1). Denklem 2.2’nin tersinin alınmasıyla şekil değiştirme-gerilme bağıntısı Denklem 2.3 ile tanımlanmaktadır (Jones, 1975). Denklem 2.3’te S_{ij} esneklik matrisini göstermektedir ve esneklik matrisi Denklem 2.4 ile verilmektedir (Jones, 1975).



Şekil 2.1 Tek yönlü takviyeli kompozit malzeme için eksenler.

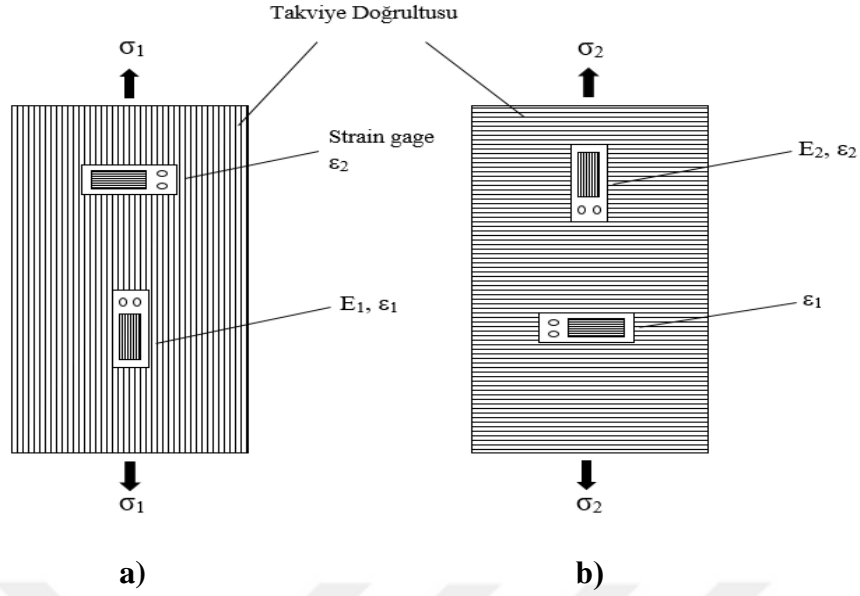
$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & 0 \\ S_{13} & S_{23} & S_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} \quad [2.3]$$

$$\{S_{ij}\} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{21}}{E_2} & -\frac{\nu_{31}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\nu_{32}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{13}}{E_1} & -\frac{\nu_{23}}{E_2} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{31}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \quad [2.4]$$

Denklem 2.4' den görüldüğü üzere ortotropik malzemede S_{ij} esneklik matrisi dokuz bağımsız elemanla ($E_1, E_2, E_3, G_{12}, G_{13}, G_{23}, \nu_{12}, \nu_{13}, \nu_{23}$) tanımlanmaktadır. Ayrıca bunlara ek olarak üç adet bağımlı sabit ($\nu_{21}, \nu_{31}, \nu_{32}$) vardır. Burada E (elastisite modülü), G (kayma modülü) ve ν (Poisson oranı) genel olarak malzemenin mühendislik sabitleri diye adlandırılmaktadır. Ortotropik malzemede mühendislik sabitlerinin bulunabilmesi için basit çekme ve kayma testleri yapılmaktadır. Aşağıda kompozit malzemeler için uygulanan testler sırasıyla anlatılmaktadır.

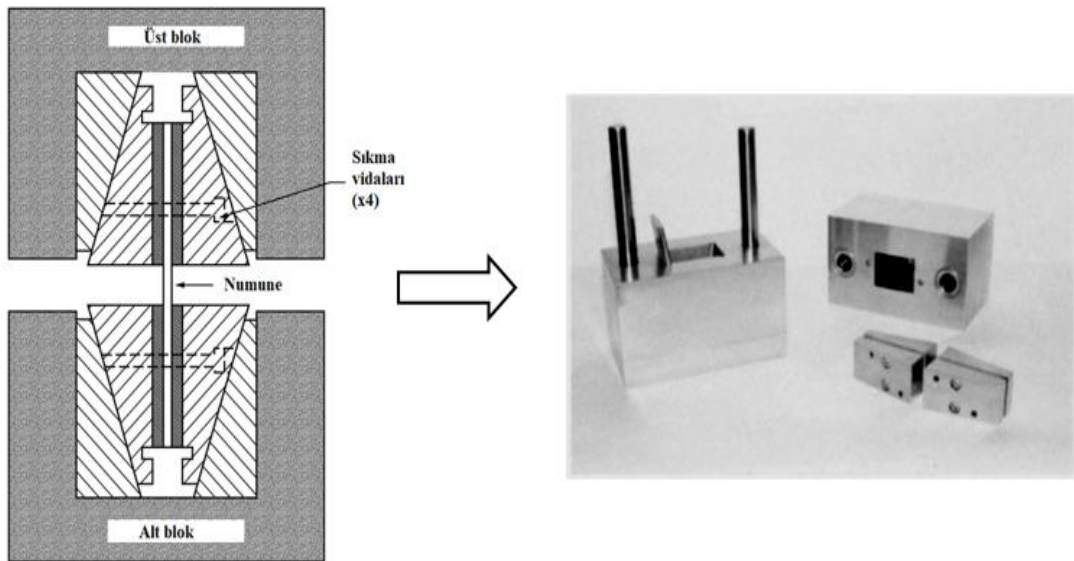
Kompozit malzemenin takviye doğrultusunda ve takviyeye dik doğrultuda elastisite modülü, kopma mukavemeti ve Poisson oranı gibi özelliklerini tespit etmek için belirlenen doğrultularda çekme kuvveti uygulanmaktadır. Ayrıca malzeme üzerine fiber yönü ve transvers yönde yapıştırılan *strain-gage*' ler vasıtasıyla birim şekil değiştirmeler ölçülmektedir (Şekil 2.2). Bu testin uygulanmasında ASTM D3039 standardı esas alınmaktadır.

Çekme testi elastisite modülünün yanısıra kayma modülünün bulunmasına da olanak sağlamaktadır. Bunun için $\mp 45^\circ$ oryantasyona sahip kompozit malzemelere çekme kuvveti uygulanmaktadır (ASTM D3518).



Şekil 2.2 a) Fiber doğrultusu b) Fibere dik doğrultuda çekme özelliklerinin belirlenmesi (Jenkins,1998).

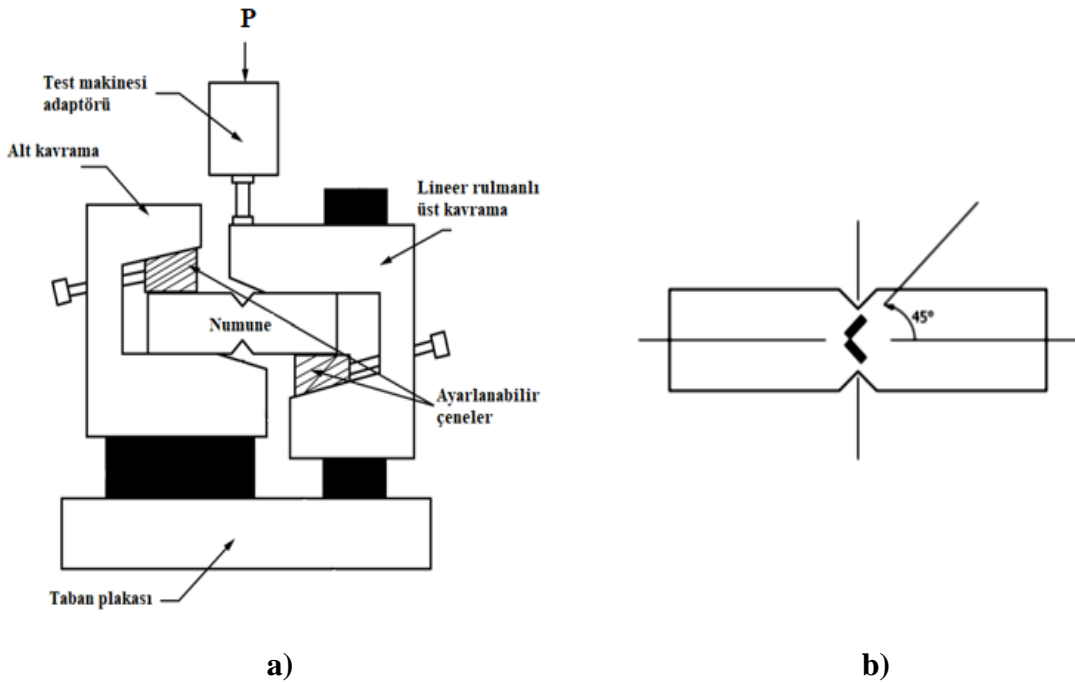
Kompozit malzemelerin basma mukavemeti ve modülünün bulunması amacıyla özel olarak tasarlanmış aparata yerleştirilen numuneye basma yükü uygulanmaktadır. Basma testinin yapılmasına yönelik yaygın olarak ASTM D3410 standardı kullanılmaktadır. Şekil 2.3'de bu standart esas alınarak tasarlanan aparata numune yerleştirilmiştir. Burkulmayı önlemek amacıyla numunenin büyük kısmı alt ve üst çenelerde tutturularak çok az kısmı açıkta bırakılmıştır.



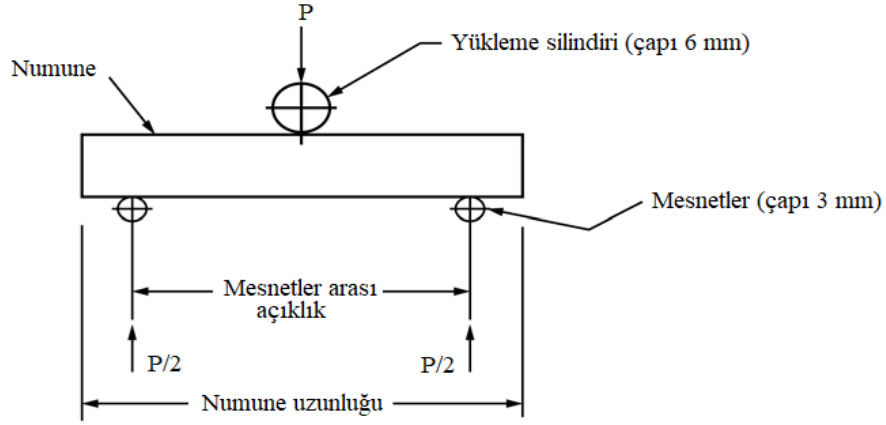
Şekil 2.3 Basma aparatı (ASTM D3410).

Kompozit malzemelerde kayma mukavemetinin belirlenebilmesi için burulma tüpü, karşılıklı kuvvet çiftleri, *rail shear* test metodu ve Iosipescu kayma testi gibi çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Prensip olarak aynı olan bu yöntemler birbirlerinden bazı farklılıklar göstermektedir. Bunlar arasında en çok kullanılan ve en doğru sonuç veren yöntem Iosipescu metodudur. Bu yöntemde iki kenarına V şeklinde çentik açılmış numuneye basma yükü uygulanarak kayma mukavemeti belirlenmektedir (Şekil 2.4a). Ayrıca Şekil 2.4b’de görüldüğü gibi numunede iki çentik arasındaki bölgeye *strain-gage* yapıştirılarak kayma modülü bulunmaktadıdır.

Tabakalar arası kayma mukavemeti, kompozit malzemelere özgü bir mekanik özelliktir. Tabakalı kompozit malzemelerde yükün etkisiyle interlaminar kayma gerilmeleri meydana gelmektedir. Bu gerilmelerin etkisiyle ise çok önemli bir hasar mekanizması olan delaminasyon (tabakaların ayrışması) oluşmaktadır. Bu nedenle interlaminar kayma mukavemetinin belirlenmesi önem arz etmektedir. İnterlaminar kayma mukavemetini belirlemek için ASTM D2344 *Short Beam Shear* ya da ASTM D3846 *Double Notch Shear* metotları kullanılmaktadır. Bunların arasında ASTM D2344 üç nokta eğme kayma testi tercih edilmektedir (Şekil 2.5).

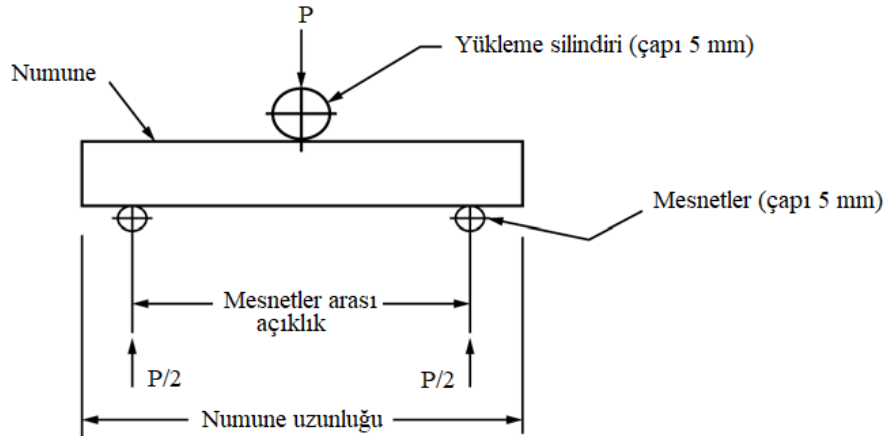


Şekil 2.4 a) Kayma aparatı b) Numunede *strain-gage* yerleşimi (ASTM D5379).



Şekil 2.5 Short Beam Shear test düzeneği (ASTM D2344).

Kompozit malzemeler çeşitli çalışma koşulları içerisinde uygulanan yükün etkisiyle eğilmeye de maruz kalmaktadır ve eğilme nedeniyle malzemede oluşan gerilmelerin de belirlenmesi gerekmektedir. Uygulamada kompozit malzemenin esneklik mukavemetini tespit etmek için ASTM D790 üç nokta eğme ve ASTM D6272 dört nokta eğme testleri yapılmaktadır. ASTM D790 testi yöntem olarak ASTM D2344 ile benzerlik göstermektedir. Sadece silindir çapları ile numune boyutları değişmektedir. Şekil 2.6’da üç nokta eğme test düzeneği görülmektedir.



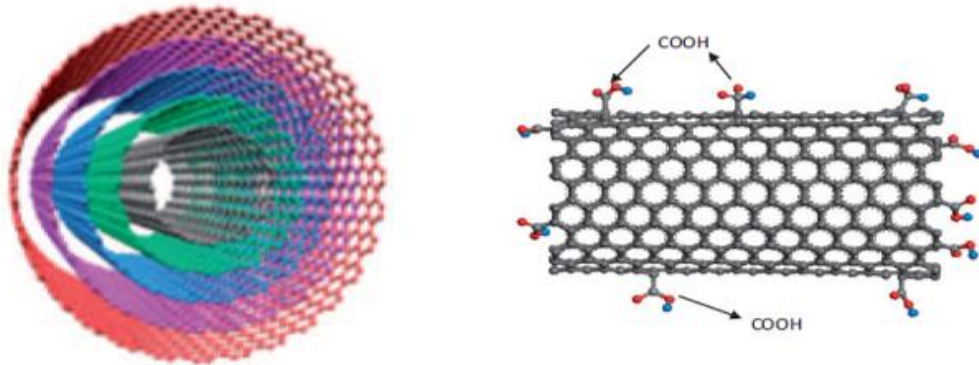
Şekil 2.6 Üç nokta eğme test düzeneği (ASTM D790).

3. MATERYAL VE TEST METODLARI

3.1 E-cam lifi/Epoksi Tabakalı Kompozit Malzemelerin İmalatı

Bu çalışmada kullanılan tabakalı kompozit plakaların imalatları Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Kompozit Malzeme Laboratuvarı'nda yapılmıştır. Nanopartikül katkı ve katkısız kompozit malzemeler el yatırma ve vakum torbalama yöntemiyle elde edilmiştir. Matris malzeme olarak Bisphenol A tipi F-1564 epoksi ve F-3487 sertleştirici, 100:34 kütle oranında karıştırılmıştır. Takviye elemanı olarak ise 300 gr/m² ağırlığında tek yönlü takviyeli E-cam lifi kumaş kullanılmıştır. Söz konusu epoksinin 25°C sıcaklıkta yoğunluğu 1.15 g/cm³ ve viskozitesi 1200-1400 mPa.s iken, sertleştiricinin 25°C sıcaklıkta yoğunluğu 1 g/cm³ ve viskozitesi 30-70 mPa.s'dır.

Nanopartikül katkıli kompozit malzeme imalatında ağırlıkça % 0.1, 0.3, 0.5 oranlarında karboksilik asitle fonksiyonlaştırılmış çok duvarlı karbon nanotüp ve ağırlıkça % 1, 3, 5 oranlarında montmorillonit nanokil kullanılmıştır. Deneylede farklı çap ve uzunluğa sahip olan üç ayrı tip karbon nanotüp incelenmiştir. Çok duvarlı karbon nanotüp ve karboksilik asit (COOH) ile karbon nanotüpün fonksiyonlaştırılmasına yönelik şematik gösterimler Şekil 3.1'de verilmiştir. Ayrıca üç farklı tip karbon nanotüpe ait teknik özellikler Tablo 3.1'de gösterilmiştir. Karbon nanotüp yüzeyinin kimyasal olarak fonksiyonlaştırılması, karbon nanotüp ve epoksi grupları arasında kovalent bağ oluşturmaktadır (Rahman vd., 2013). Böylece karbon nanotüplerin topaklanma eğilimi azalmakta, matris içinde karbon nanotüp dağılımı kolaylaşmakta ve fonksiyonlaştırma işlemi nanotüp ve matris arayüzey etkileşimini güçlendirmektedir (Rahman vd., 2013). Tablo 3.2'de ise nanokilin kimyasal bileşimi ve diğer özellikleri verilmiştir.



Şekil 3.1 Çok duvarlı karbon nanotüp (McCrory-Dennis ve Okoli, 2012) ve karboksilik asit (COOH) ile karbon nanotüpün fonksiyonlaştırılması (Rao vd., 2015).

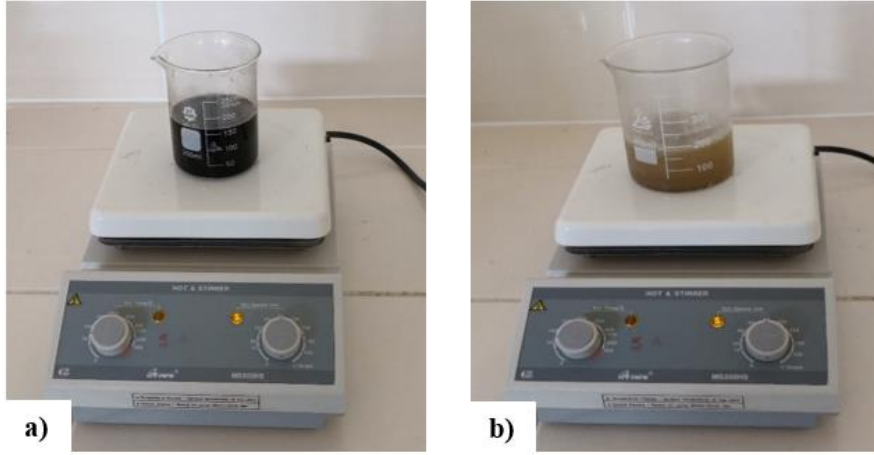
Tablo 3.1 Karbon nanotüplerin teknik özellikleri (Url-1)

Teknik özellik	KNT1	KNT2	KNT3
Dış çap (nm)	10 – 20	10 – 20	30 – 50
İç çap (nm)	5 – 10	5 – 10	5 – 12
Uzunluk (µm)	0.5 – 2	10 – 30	10 – 20
Safılık (%)	> 95	> 95	> 95
Özgül yüzey alanı (m ² /g)	> 200	> 200	> 60
Gerçek yoğunluk (g/cm ³)	~ 2.1	~ 2.1	~ 2.1
Yığın yoğunluğu (g/cm ³)	0.22	0.22	0.22

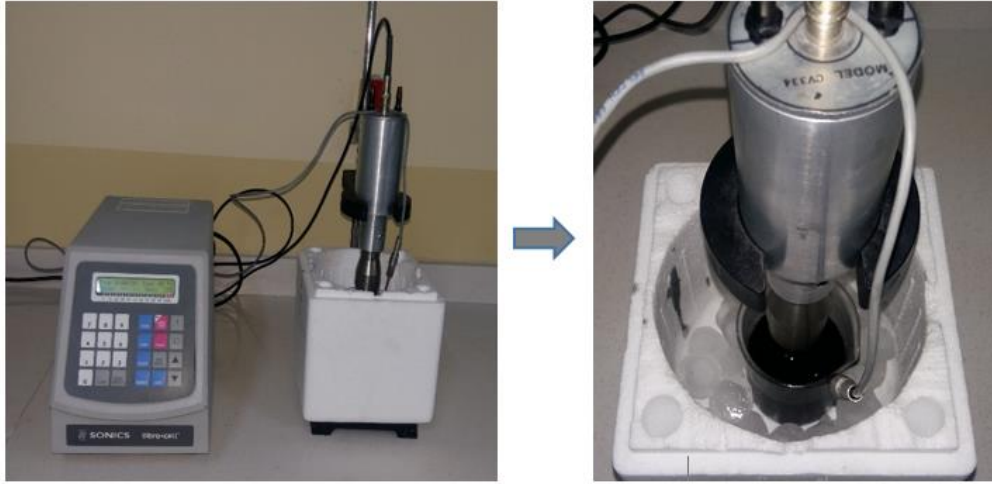
Tablo 3.2 Nanokilin teknik özellikleri (Url-1)

Mineral	Partikül boyutu (nm - µm)	Özgül yüzey alanı (m²/g)	Yığın yoğunluğu (g/cm³)	Kimyasal bileşenleri (%)	
				SiO ₂	53.28
				Al ₂ O ₃	20.67
				LOI	14
				Fe ₂ O ₃	6.13
Montmorillonit	1 – 2	50	0.5 – 0.7	MgO	2.82
				CaO	1.71
				K ₂ O	0.82
				TiO ₂	0.63
				Na ₂ O	0.02

Üretime başlanmadan önce ilk olarak istenilen sayı ve boyuttaki kumaşlar özel makaslarla kesilerek hazırlanmıştır. Kumaş ağırlığı ile orantılı olacak şekilde gerekli epoksi miktarı hesaplanmıştır. Katkısız kompozit malzeme üretiminde epoksi içerisine sertleştirici eklenerek reçine sistemi oluşturulmuştur. Katkılı kompozit malzeme imalatında ise belirlenen ağırlık yüzdelerindeki nanopartiküller epoksi içerisine eklenmiştir. İki kademeli olarak karıştırma işlemi yapılmıştır. Epoksi ile nanopartikül karışımı başlangıçta 800 rpm ve 40°C’de yarım saat manyetik karıştırıcıda karıştırılmıştır (Şekil 3.2). Ardından karışımı homojen hale getirmek amacıyla SONICS marka sonikatör kullanılarak % 25 amplitude ile yarım saat daha karıştırılmıştır (Şekil 3.3).



Şekil 3.2 a) Epoksi-nanotüp karışımı **b)** Epoksi-nanokil karışımına manyetik karıştırıcı ile ön işlem yapılması.



Şekil 3.3 Epoksi-nanopartikül karışımının buz banyosunda sonikatör ile karıştırılması.

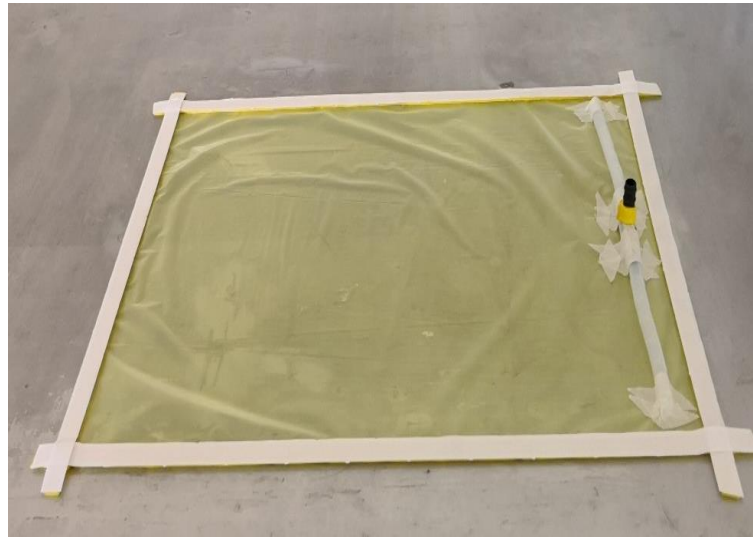
Sonikatörle karıştırma yapılırken termokupl kullanılarak sıcaklık kontrol edilmiştir. Ayrıca aşırı ısınma nedeniyle beherin etrafı buzlarla desteklenmiştir (Şekil 3.3). Son olarak karışıma sertleştirici eklenmiş ve mekanik karıştırıcıda 10 dk karıştırılmıştır. Böylece epoksi ile sertleştirici arasında reaksiyon başlamıştır.

Üretim için üzerinde alüminyum ısı tablası, vakum pompası ve elektronik donanımı olan vakumlu ısı masası adı verilen özel bir masa kullanılmıştır (Şekil 3.4). Vakumlu ısı masası üzerine kalıp ayırıcı serilerek her bir kenarından sızdırmazlık bandı ile yapılandırılmıştır (Şekil 3.5). Ortasında T bağlantısı yapılmış olan spiral hortum kalıp ayırıcının vakum hattına yakın olan kenarına yerleştirilmiştir. İlk kat kumaş yerleştirilmeden önce ilgili bölgeye kayma olmaması için bir miktar reçine karışımından

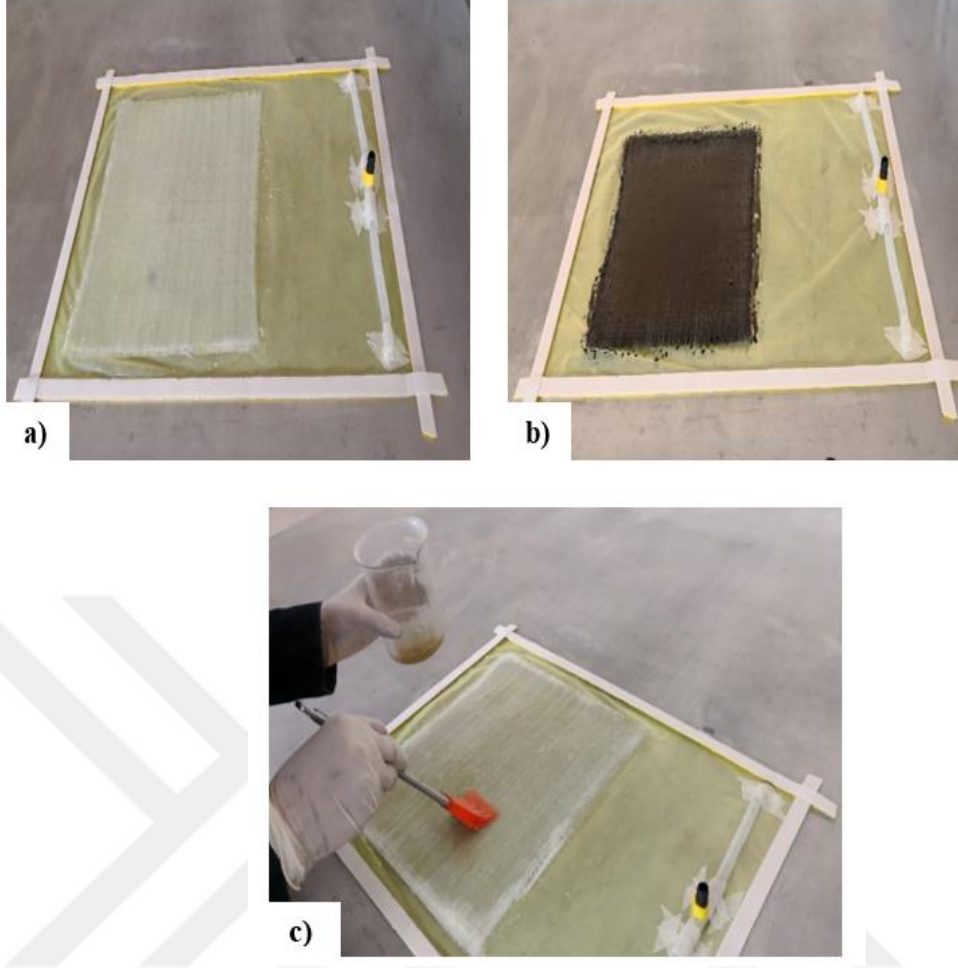
sürülmüştür. Daha sonra hazırlanan kumaşlar sırasıyla üst üste serilmiştir. Her bir kattaki kumaş serildikten sonra üzerine fırça vasıtasıyla epoksi karışımı sürülmüştür (Şekil 3.6).



Şekil 3.4 Vakumlu ısı masası.



Şekil 3.5 Kalıp ayırıcı ve T bağlantılı spiral hortumun yerleştirilmesi.



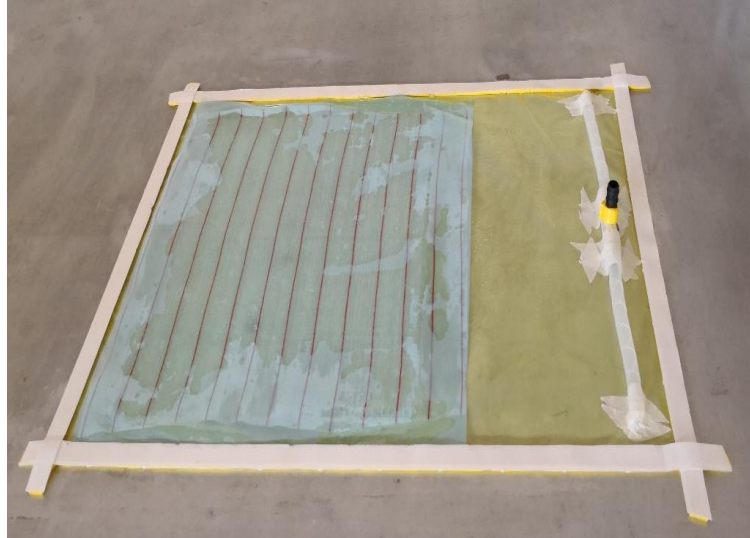
Şekil 3.6 a) Katkısız b) Nanotüp c) Nanokil karışımının kumaşlara sürülmesi.

Son kat kumaşın üzerine sırasıyla soyma kumaşı, delikli naylon ve vakum battaniyesi yerleştirilmiştir (Şekil 3.7-3.9). Bu katmanlar içerisinde delikli naylon hava boşluklarının ve fazla reçinenin vakum battaniyesine iletilmesini sağlarken, vakum battaniyesi iletilen fazla reçineyi absorbe etmektedir. Ardından son katman olan vakum naylonu her bir kenardaki sızdırmazlık bantı üzerine yapıştırılmıştır. Vakum esnasında naylonun zarar görmemesi için karşılıklı iki kenar ve son birleşme noktasında vakum naylonun iç tarafında küçük bir alana çift taraflı bant yapıştırılarak fazladan boşluk bırakılmıştır. Ardından T bağlantıya pompanın hortumu bağlanmış ve vakum hattı oluşturulmuştur (Şekil 3.10). Son olarak vakum pompası çalıştırılmış ve malzeme üzerine 1 atmosferlik basınç uygulanarak içerisindeki hava alınmıştır. Bu işlemin belli bir süre tatbik edilmesinden sonra pompa kapatılarak basınç göstergesinden hava kaçağı kontrolü yapılmıştır. Sızdırmazlık sağlandığından emin olunduktan sonra vakumlu ısı masasının elektronik kısmından kütleme sıcaklığı ve zamanı ayarlanmıştır. 100°C’de 2 saat süre ile kütleme işlemi yapılmıştır. Kütleme işlemi tamamlandıktan sonra malzemenin soğuması

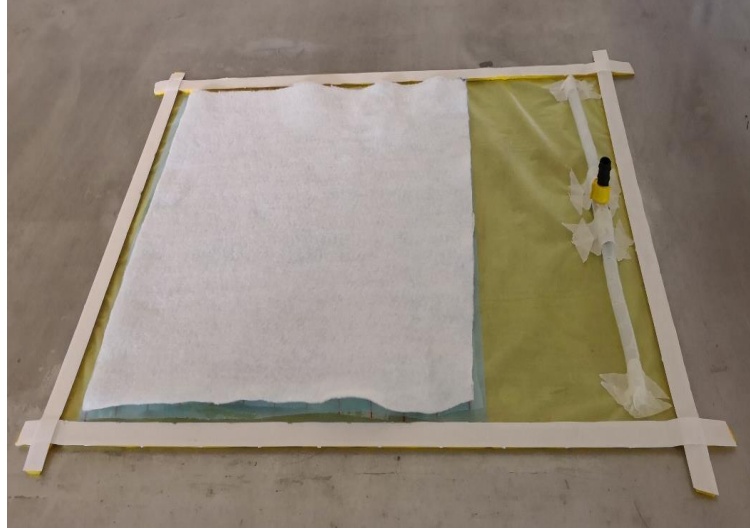
beklenmiş ve ardından sökülerek kullanıma hazır hale getirilmiştir. Üretimi yapılan kompozit malzemeler Adana'da bulunan *WJ Germany* firmasında su jeti yöntemiyle kesilerek her bir standarda uygun test numuneleri elde edilmiştir. Kesim öncesinde AUTOCAD programında test numunelerinin çizimleri yapılarak sayısal kodlar bulunmuştur. Bilgisayar kontrollü olarak çalışan su jeti tezgâhlarında bu kodlar kullanılarak üç yüz yirmi beş numune kesilmiştir.



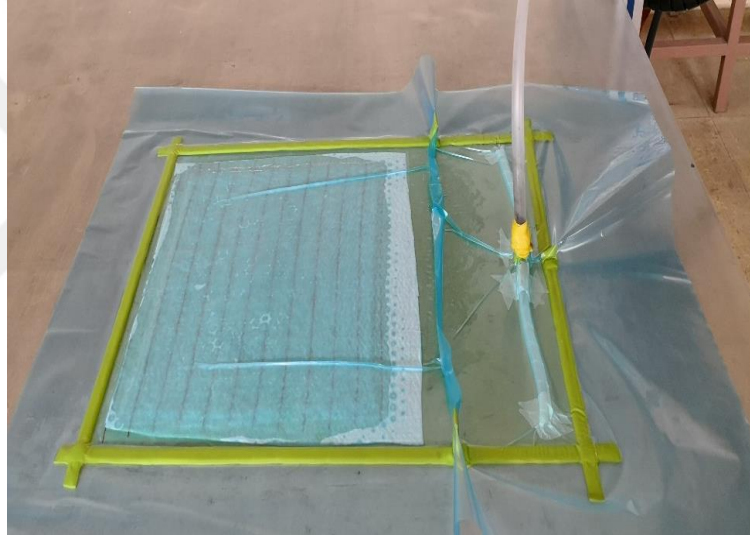
Şekil 3.7 Soyma kumaşının yerleştirilmesi.



Şekil 3.8 Delikli naylonun yerleştirilmesi.



Şekil 3.9 Vakum battaniyesinin yerleştirilmesi.

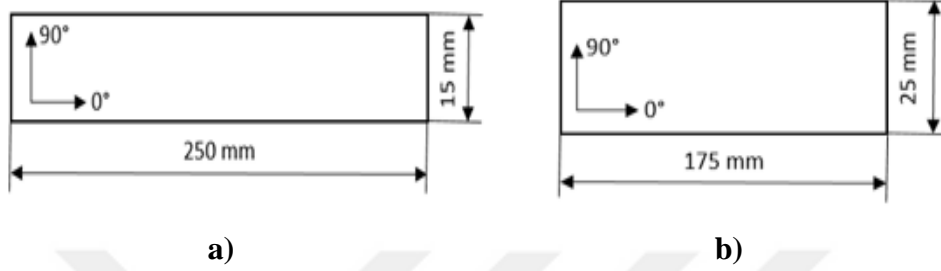


Şekil 3.10 Malzemenin vakum naylonu ile kapatılması ve oluşturulan vakum hattında pompa vasıtasıyla içerideki havanın alınması.

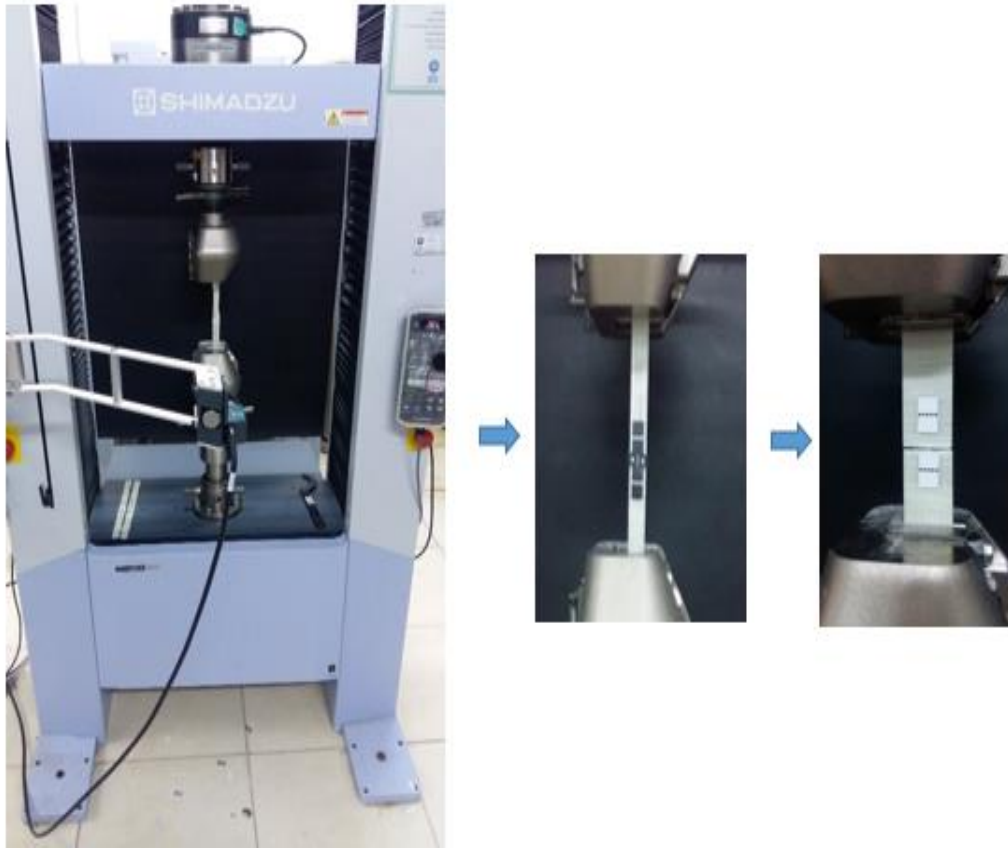
3.2 Çekme Deneyi (ASTM D3039)

Nanopartikül katkılı ve katkısız numunelerin çekme testleri ASTM D3039M-14 standardı esas alınarak yapılmıştır. Bu test ile takviye doğrultusunda çekme mukavemeti, elastisite modülü, Poisson oranı ve takviyeye dik doğrultuda çekme mukavemeti, elastisite modülü bulunmuştur. Takviye doğrultusunda $[0^\circ]_4$ oryantasyona sahip 250x15 mm boyutlarındaki numuneler kullanılmıştır (Şekil 3.11a). Takviyeye dik doğrultuda ise $[90^\circ]_8$ oryantasyonlu 175x25 mm boyutlarında malzemeler incelenmiştir (Şekil 3.11b). Her iki doğrultudaki numunenin ortalama kalınlık değeri sırasıyla 1.23 ve 2.54 mm'dir.

Fiber yönünde test yapılırken çekme cihazı çenelerinin numuneye olası hasarını önlemek için tab kullanılmıştır. Tab, boyutları 56x15 mm olan $[0^\circ/90^\circ/0^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ]$ dizilime sahip malzemeden imal edilmiştir. Tablar özel bir yapıştırıcı kullanılarak numunenin her iki ucuna arkalı-önlü olmak üzere yapıştırılmıştır. Testler SHIMADZU marka universal test cihazında yapılmıştır (Şekil 3.12).



Şekil 3.11 a) Takviye doğrultusu b) Takviyeye dik doğrultuda çekme numunesi.



Şekil 3.12 Takviye doğrultusunda ve takviyeye dik doğrultuda çekme testinin yapılması.

Çekme testi öncesinde her bir numune için *gage* bölgesindeki üç ayrı yerde kesit alanı bulunarak ortalama alan hesaplanmıştır. Test esnasında hem aksenal hem de yanal uzamaları ölçmek için video ekstansometre kullanılmıştır. Teste başlanmadan önce numunenin üzerine kameranın görebileceği şekilde iki etiket yapıştırılmış ve etiketler arası mesafe ölçülmüştür. Test esnasında yüke karşılık uzama miktarları kaydedilmiştir. Deney numuneleri kopuncaya kadar çekme işlemine devam edilmiştir. Testler 2 mm/dk hız ile gerçekleştirilmiştir. Hem takviye doğrultusunda hem de takviyeye dik doğrultuda tüm testler için beş tekrar yapılmıştır.

Test sonuçlarına göre Denklem 3.1'den fiber yönünde ve fibere dik yönde çekme mukavemeti hesaplanmıştır. Birim şekil değiştirmeler ise Denklem 3.2'ye göre belirlenmiştir. Her bir numuneye ait gerilme-birim şekil değiştirme grafiği çizilmiştir. Standartta belirtildiği üzere gerilme-birim şekil değiştirme eğrisinin alt yarısında olmak kaydıyla belirlenen iki nokta arasındaki gerilme ve birim şekil değiştirmelerin farkı bulunmuştur. Buna göre Denklem 3.3'den E_1 ve E_2 elastisite modülleri hesaplanmıştır. Yine birim-şekil değiştirme grafiğinde belirlenen iki noktadan aksenal ve yanal yöndeki birim şekil değiştirme farkları bulunarak Denklem 3.4'e göre ν_{12} Poisson oranı bulunmuştur.

$$\sigma_t = \frac{P_{max}}{A} \quad [3.1]$$

- σ_t : Çekme mukavemeti, MPa
 P_{max} : Maksimum yük, N
 A : Ortalama kesit alanı, mm²

$$\varepsilon = \delta/L \quad [3.2]$$

- ε : Birim şekil değiştirme, mm/mm
 δ : Uzama ya da kısalma miktarı, mm
 L : İlk boy, mm

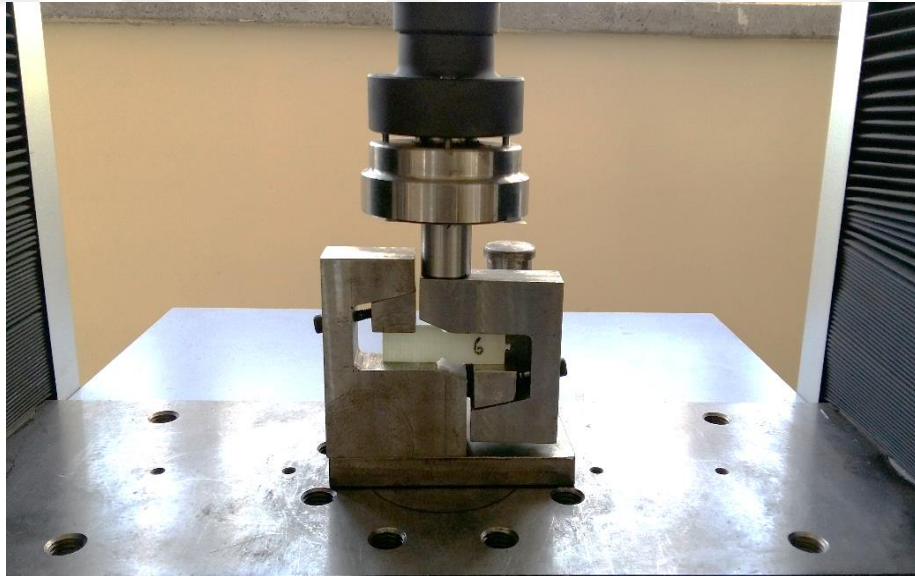
$$E = \Delta\sigma/\Delta\varepsilon \quad [3.3]$$

Denklem 3.3'te σ , MPa cinsinden gerilmeyi ifade etmektedir.

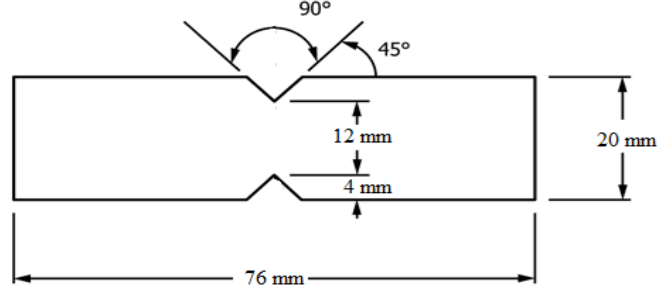
$$\nu_{12} = -\frac{\Delta \varepsilon_t}{\Delta \varepsilon_l} \quad [3.4]$$

3.3 Kayma Deneyi (ASTM D5379)

$[0^\circ/90^\circ]_{3S}$ oryantasyona sahip plakalardan elde edilen katkısız ve nanopartikül katkılı numunelerle ASTM D5379M-12 standardına göre düzlem içi kayma testi yapılmıştır. Kayma testinden önce her bir numune için çentik hattı boyunca genişlik ve kalınlık değeri ölçülerek kesit alanı hesaplanmıştır. SHIMADZU marka üniversal test cihazında kayma testleri gerçekleştirilmiştir. Bu standarda göre V çentikli numune Iosipescu aparatına yerleştirilerek basma yükü uygulanmıştır (Şekil 3.13). Bu yöntemde numunenin çentik hattı boyunca karşılıklı kuvvet çifti uygulanarak kayma gerilmesi oluşturulmuştur. Şekil 3.14'de örnek bir test numunesi boyutlarıyla birlikte gösterilmiştir. Numune kalınlığı ortalama olarak 4.23 mm'dir. Test hızı standarda göre 2 mm/dk olarak alınmıştır. Her bir test beş kez tekrar edilmiştir. Yapılan testler sonucunda elde edilen maksimum yük değerlerine göre Denklem 3.5'ten kayma mukavemeti hesaplanmıştır.



Şekil 3.13 V çentikli test numunesinin Iosipescu aparatına yerleştirilmesi ve basma yükü uygulanması.



Şekil 3.14 V çentikli kayma numunesi.

$$S = P_{max}/A \quad [3.5]$$

S : Kayma mukavemeti, MPa

P_{max} : Maksimum yük, N

A : Kesit alanı, mm²

3.4 Esneklik Deneyi (ASTM D790)

ASTM D790-15 standardına göre üç nokta eğme testleri gerçekleştirilmiştir. Testler SHIMADZU marka universal çekme-basma test cihazında yapılmıştır. Testlere başlamadan önce her bir numunenin genişliği ve kalınlığı ölçülmüştür. Mesnet silindirlerinin merkezleri arasındaki mesafenin numune kalınlığına oranı 16 olarak alınmıştır. Deneylerde kullanılan 13x100 mm dikdörtgen kesitli [0°/90°]_{3s} oryantasyona sahip numunelerin ortama kalınlık değeri 4.2 mm'dir. Numuneler kompozit malzemeler için özel olarak tasarlanmış üç nokta eğme aparatının mesnet silindirleri üzerine yerleştirilerek orta noktadan basma yükü uygulanmıştır (Şekil 3.15). Yükleme başlığı ve mesnetlerin silindir çapları 5 mm'dir (Bkz. Şekil 2.6). Test numunesinin dış yüzeyindeki maksimum birim şekil değiştirme 0.05 mm/mm'ye ulaştığında ya da numune kırıldığında test sonlandırılmıştır. Katkısız ve nanopartikül katkılı kompozitlerin tüm testleri için beş tekrar yapılmıştır.



Şekil 3.15 Üç nokta eğme testinin yapılması.

Test hızı Denklem 3.6'ya göre belirlenmiş ve 1.83 mm/dk olarak alınmıştır. Test esnasında maksimum yükler bulunarak, Denklem 3.7'ye göre esneklik mukavemeti hesaplanmıştır.

$$R = Zs^2/6t \quad [3.6]$$

R : Test hızı, mm/dk

s : Mesnet silindirlerinin merkezleri arasındaki mesafe, mm

t : Numune kalınlığı, mm

Z : Dış yüzdeki liflerin şekil değiştirme oranı, 0.01 mm/mm/dk

$$\sigma_f = 3P_{max}s/2wt^2 \quad [3.7]$$

σ_f : Esneklik mukavemeti, MPa

P_{max} : Maksimum kuvvet, N

w : Numune genişliği, mm

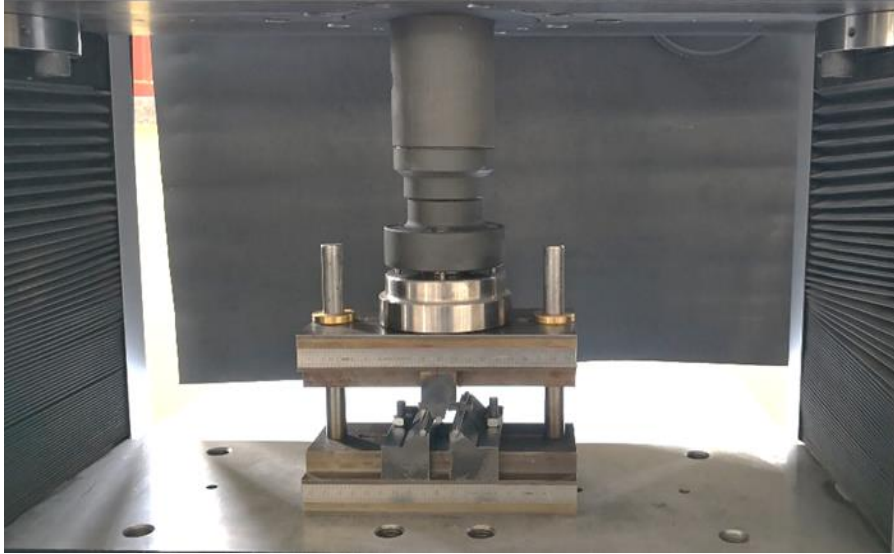
3.5 Tabakalar Arası Kayma Mukavemeti Deneyi (ASTM D2344)

[0°/90°]_{3S} dizilimli malzemelerin tabakalar arası kayma mukavemeti testleri ASTM D2344 M-13 standardına göre yapılmıştır. Yapılacak testler öncesinde numunenin orta noktasında genişlik ve kalınlık değerleri ölçülmüştür. Mesnet silindirlerinin merkezleri arasındaki mesafenin numune kalınlığına oranı 5 olarak alınmıştır. Testlerde 40x8 mm boyutlarında dikdörtgen kesitli numuneler kullanılmıştır. Numunelerin ortalama kalınlık değeri 4.2 mm'dir. Yükleme başlığı ve mesnet silindirlerinin çapı sırasıyla 6 ve 3 mm'dir (Şekil 2.5).

Test numunesi Şekil 3.16'da görülen aparata yerleştirilmiş ve SHIMADZU marka universal test cihazında basma yüküne maruz bırakılmıştır. Testlere yükte % 30 dan fazla düşme oluncaya ya da numune kırılıncaya kadar devam edilmiştir. Test hızı standarda göre 1 mm/dk olarak alınmıştır. Testlerde beş tekrar yapılmıştır.

$$\sigma_{sbs} = 0.75 \times \frac{P_{max}}{w \times t} \quad [3.8]$$

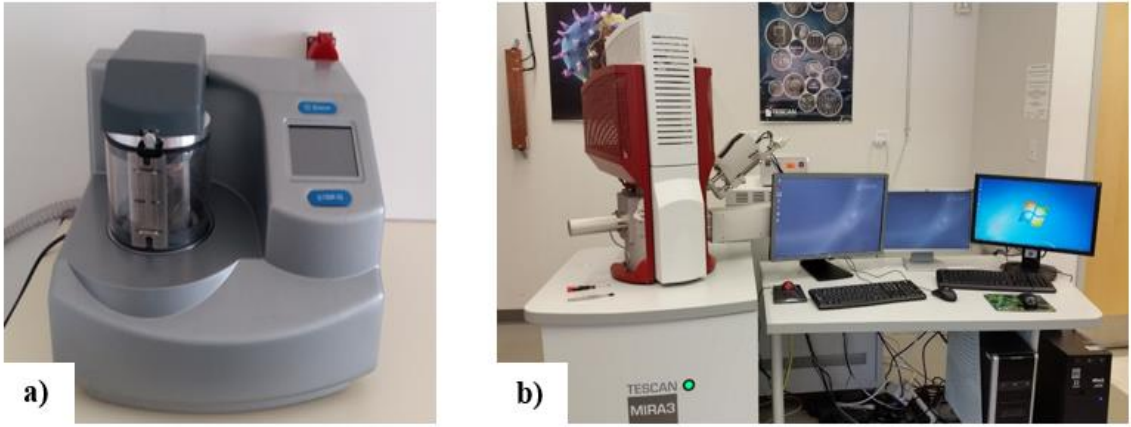
Denklem 3.8'de σ_{sbs} tabakalar arası kayma mukavemeti olmak üzere P_{max} maksimum yük, w numune genişliği ve t numune kalınlığını göstermektedir.



Şekil 3.16 Tabakalar arası kayma mukavemeti deneyinin yapılması.

3.6 Kırılma Yüzeylerinin Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ile İncelenmesi

Hasarlı numunelerin içyapı incelemeleri Sivas Cumhuriyet Üniversitesi İleri Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi'nde bulunan TESCAN MIRA3 adlı SEM (*Scanning Electron Microscope*) cihazıyla yapılmıştır (Şekil 3.17). Çekme, kayma, esneklik ve tabakalar arası kayma mukavemeti testlerinde kullanılan numunelerin (katkısız, karbon nanotüp ve nanokil içeren) taramalı elektron mikroskobu ile kırılma yüzeyleri araştırılmıştır. Numuneler hasar bölgesinin sağ ve sol tarafında 1'er cm bırakılarak kesme cihazında kesilmiş ve ardından numune yüzeyi temizlenmiştir. Daha sonra numuneler metal bir plakanın üzerine konularak karşılıklı iki kenardan vidalarla tutturulmuştur. Numune yüzeyini iletken hale getirmek için Au-Pd (altın-paladyum) tabakası ile kaplama yapılmıştır. Son olarak numunelerin bulunduğu plaka cihazın dönel tablasına yerleştirilmiş ve içyapı araştırılmıştır.



Şekil 3.17 a) Au-Pd kaplama ünitesi b) Taramalı elektron mikroskobu.

4. SONUÇLAR

4.1 Parametreler

Bu çalışmada tek yönlü fiber takviyeli E-cam lifi/epoksi tabakalı kompozit malzemenin fiber doğrultusunda çekme mukavemeti, elastisite modülü, Poisson oranı ve fibere dik doğrultuda çekme mukavemeti, elastisite modülü araştırılmıştır. Ayrıca kayma mukavemeti, esneklik mukavemeti ve tabakalar arası kayma mukavemeti gibi mekanik özellikleri incelenmiştir. Kompozit malzemenin matris elemana bağlı özelliklerini iyileştirebilmek amacıyla epoksi içerisine nanopartikül takviyesi yapılmıştır. Bu amaçla montmorillonit nanokil ve karboksilik asitle (COOH) fonksiyonlaştırılmış çok duvarlı karbon nanotüp kullanılmıştır. Fiber yönünde ve fibere dik doğrultuda çekme testleri için beş tekrar yapılmıştır. Esneklik ve kayma mukavemetleri için deneyler beş kez tekrar edilmiştir. Tabakalar arası kayma mukavemeti testleri için ise yine beş tekrar yapılmıştır.

Ağırlıkça % 1, 3 ve 5 oranlarında nanokil epoksi içerisine katılarak farklı nanokil oranlarının kompozit malzemenin mekanik özellikleri üzerine etkisi araştırılmıştır. Literatürde yapılan çalışmalarda matris içerisine ağırlıkça % 1 - 10 arasında nanokil takviyesi yapılmıştır (Bozkurt vd., 2007; Chandradass vd., 2008; Kanny ve Mohan, 2014; Mahesh vd., 2012; Tsai ve Wu, 2008).

Çap ve uzunluk bakımından farklı özelliklere sahip üç ayrı çok duvarlı karbon nanotüp kullanılmıştır. Karbon nanotüpler karboksilik asit (COOH) ile kimyasal olarak fonksiyonlaştırılmıştır. KNT1 adlı karbon nanotüp 10-20 nm dış çap, 5-10 nm iç çap, 0.5-2 µm uzunluğa sahiptir. KNT2 adlı karbon nanotüp 10-20 nm dış çap, 5-10 nm iç çap, 10-30 µm uzunluk ve KNT3 adlı karbon nanotüp ise 30-50 nm dış çap, 5-12 nm iç çap, 10-20 µm uzunluğa sahiptir. Her bir nanotüp için % 0.1, 0.3 ve 0.5 oranları incelenmiştir. Literatürde yapılan çalışmalarda ise matris içerisindeki nanotüp içeriği ağırlıkça % 0.1 - 1 arasında değişmektedir (Davis vd., 2010; Hossain vd., 2015; Rahman vd., 2013; Rao vd., 2015; Shen vd., 2014).

Tabakalı kompozit malzemenin mekanik özelliklerini araştırmak için kullanılan nanopartiküller ve yapılan testler Tablo 4.1'de gösterilmiştir. Burada nanotüp uzunluğu etkisini incelemek amacıyla KNT1 ve KNT2 adlı karbon nanotüpler kullanılmıştır. Ayrıca çap etkisini araştırmak için KNT2 ve KNT3 adlı karbon nanotüpler incelenmiştir. Toplamda üç yüz yirmi beş test yapılmıştır.

Tablo 4.1 Mekanik testler ve kullanılan parametreler.

Deney Adı	Katkısız (Ağırlıkça % 0)	Nanokil (Ağırlıkça % 1, 3, 5)	Karbon nanotüp (Ağırlıkça % 0.1, 0.3, 0.5)		
			KNT1	KNT2	KNT3
Fiber doğrultusunda çekme testi (adet)	5	15	15	15	15
Fibere dik doğrultuda çekme testi (adet)	5	15	15	15	15
Kayma testi (adet)	5	15	15	15	15
Esneklik testi (adet)	5	15	15	15	15
Tabakalar arası kayma mukavemeti testi (adet)	5	15	15	15	15
Toplam test sayısı	25	75	75	75	75

4.2 Çekme Testleri

4.2.1 Takviye doğrultusunda çekme testleri

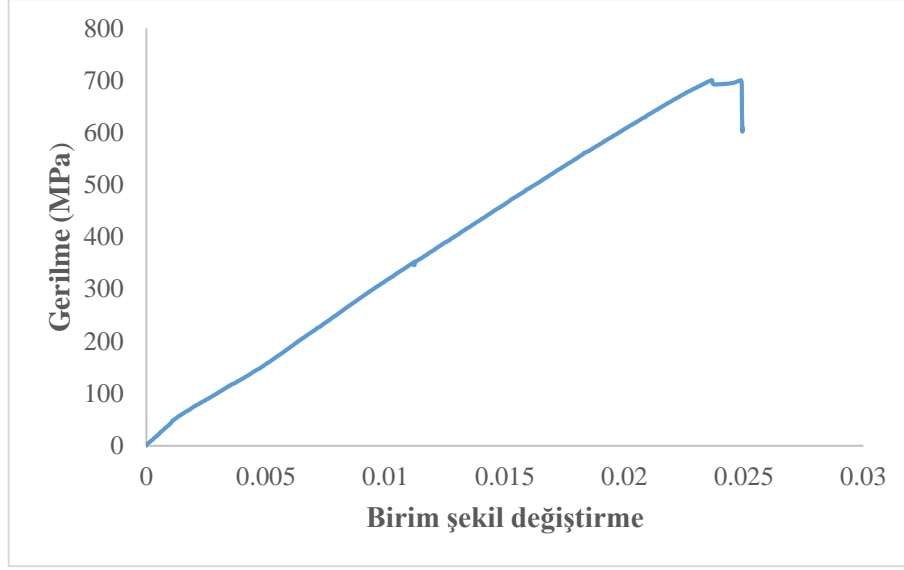
Bu çalışmada tek yönlü lif takviyeli $[0]_4$ oryantasyona sahip kompozit malzemeler kullanılmıştır. ASTM D3039 standardı esas alınarak takviye doğrultusunda çekme testleri gerçekleştirilmiştir. Katkısız ve nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin çekme testleri beş kez tekrar edilmiş ve sonuçların ortalaması alınarak standart sapmaları belirlenmiştir. Takviye doğrultusunda çekme testleri sonucunda çekme mukavemeti, elastisite modülü ve Poisson oranı bulunmuştur.

4.2.1.1 Katkısız E-cam lifi/epoksi tabakalı kompozit malzemenin takviye doğrultusunda çekme davranışı

Katkısız numunelerin takviye doğrultusunda çekme deneyi sonuçları Tablo 4.2’de görülmektedir. Şekil 4.1’de ise katkısız kompozit malzemeye ait gerilme-birim şekil değiştirme grafiği verilmektedir.

Tablo 4.2 Katkısız kompozit malzemenin takviye doğrultusunda çekme özellikleri.

Deney No	Ortalama alan (mm ²)	Maksimum yük (N)	Çekme mukavemeti (MPa)	Elastisite modülü (GPa)	Poisson oranı
1	16.55	11011.60	665.35	33.83	0.24
2	17.79	10277.40	577.71	32.47	
3	16.66	11683.90	701.31	31.98	
4	16.41	10797.00	657.95	34.48	
5	16.34	11360.00	695.23	33.35	
Ortalama			659.51	33.22	
Standart sapma			49.37	1.01	



Şekil 4.1 Katkısız kompozit malzemenin takviye doğrultusunda gerilme-birim şekil değiştirme grafiği.

4.2.1.2 KNT1 karbon nanotüp katkılı E-cam lifi/epoksi tabakalı kompozit malzemenin takviye doğrultusunda çekme davranışı

KNT1 karbon nanotüp katkılı numunelerin takviye doğrultusunda yapılan çekme deneyi sonuçları Tablo 4.3’de görülmektedir. Tablo 4.3’e bakılacak olursa oran arttıkça çekme mukavemeti azalmıştır. Katkısız numune ile kıyaslandığında % 0.1, 0.3 ve 0.5 oranlarında çekme mukavemetinde sırasıyla % 8.81, 8.82 ve 15.02 düşüş meydana gelmiştir. % 0.1 ve % 0.3 oranlarında çekme mukavemeti neredeyse aynı oranda azalmakla birlikte % 0.5 oranında kayda değer biçimde düşmüştür. Elastisite modülü ise her bir oran için azalmıştır. Ancak en büyük azalma % 0.1 oranında meydana gelmiştir ve % 0.3 ve % 0.5 oranlarında hemen hemen aynı seviyede azalma olmuştur. Katkısız numuneye göre % 0.1, 0.3 ve 0.5 oranlarında elastisite modülü sırasıyla % 7.38, 3.49 ve 3.70 düşmüştür. Poisson oranı ise her iki özelliğin dışında farklı bir davranış sergileyerek artma eğilimi göstermiştir. Katkısız numuneye göre % 0.1 oranında sabit kalmıştır. % 0.3 ve 0.5 oranlarında ise sırasıyla % 4.17 ve 12.5 artmıştır. Poisson oranı için maksimum artış % 0.5 oranında sağlanmıştır.

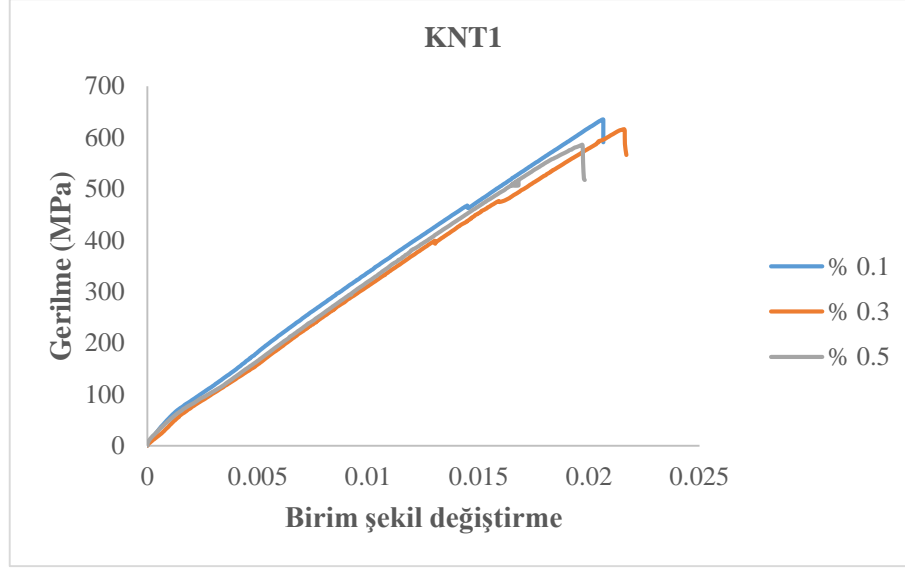
Şekil 4.2’de ise KNT1 karbon nanotüp katkılı kompozit malzemenin her bir oranı için gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri karşılaştırmalı olarak görülmektedir. Seçilen test örneklerine göre oran artışıyla birlikte malzemenin taşıyabildiği yük azalmış ve dolayısıyla gerilme de azalmıştır. KNT1 adlı karbon nanotüpün her bir oranını temsil

eden eğriler, yaklaşık 400 MPa değerine kadar neredeyse çakışıktır. Birim şekil değiştirmeler açısından bakıldığında ise en fazla uzama % 0.3 oranında ve en az uzama ise % 0.5 oranında meydana gelmiştir.

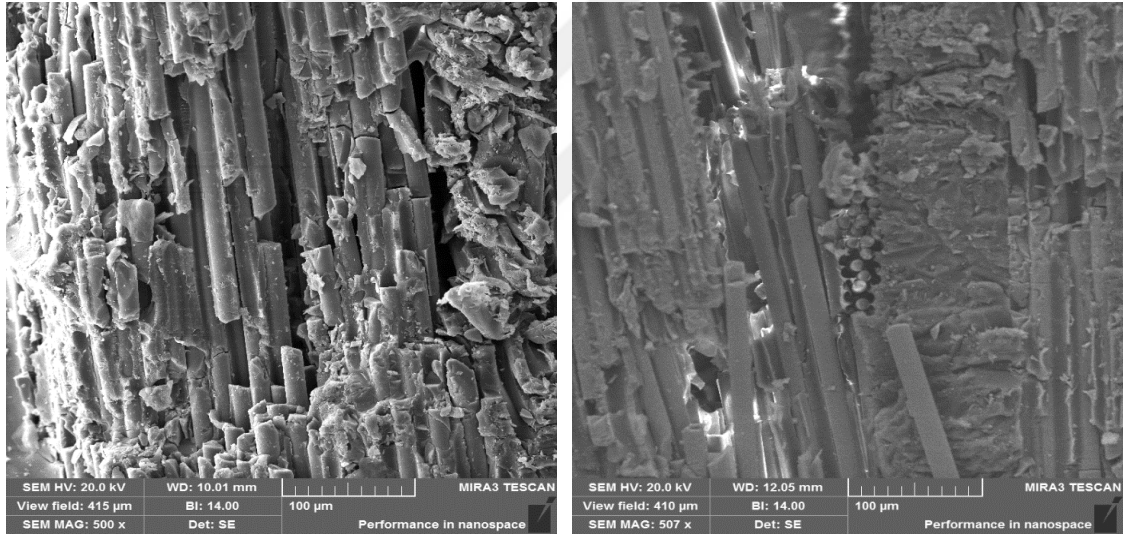
Şekil 4.3'te katkısız ve KNT1 katkılı kompozit malzemenin çekme testi sonucunda kırılma yüzeyine ait taramalı elektron mikroskobu görüntüleri görülmektedir. Her ikisinde de kırılan fiberler ile epoksi parçacıkları net görülmekte ve kırılma yüzeyleri birbirine benzemektedir. KNT1 adlı karbon nanotüp içeren kompozit malzemede kırılan fiberlerin bir kısmında daha temiz bir sıyrılma mevcuttur. Karbon nanotüp katkılı kompozit malzeme için fiber-matris arayüz yapışmasının gelişmediği ve yük transferinin azaldığı söylenebilir.

Tablo 4.3 KNT1 katkılı kompozit malzemelerin takviye doğrultusunda çekme özellikleri.

Numune Adı	Deney No	Ortalama alan (mm ²)	Maksimum yük (N)	Çekme mukavemeti (MPa)	Elastisite modülü (GPa)	Poisson oranı
KNT1 % 0.1	1	17.69	11238.00	635.27	32.44	0.24
	2	18.13	10162.70	560.55	30.30	
	3	17.96	10462.30	582.53	29.64	
	4	17.87	10514.70	588.40	31.04	
	5	17.96	11502.60	640.46	30.42	
Ortalama				601.44	30.77	
Standart sapma				34.88	1.06	
KNT1 % 0.3	1	18.05	10733.10	594.63	30.07	0.25
	2	18.25	11179.30	612.56	32.50	
	3	16.91	10422.60	616.36	31.74	
	4	17.98	10882.50	605.26	32.45	
	5	17.47	10092.80	577.72	33.52	
Ortalama				601.31	32.06	
Standart sapma				15.57	1.28	
KNT1 % 0.5	1	17.34	10162.70	586.08	31.50	0.27
	2	17.24	10605.40	615.16	33.95	
	3	17.77	9422.30	530.24	30.57	
	4	17.75	9582.50	539.86	31.82	
	5	18.02	9568.07	530.97	32.10	
Ortalama				560.46	31.99	
Standart sapma				38.26	1.24	



Şekil 4.2 Ağırlıkça farklı oranlardaki KNT1 katkılı kompozit malzemelerin takviye doğrultusunda gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri.



a)

b)

Şekil 4.3 a) Katkısız b) KNT1 katkılı (% 0.1 oranı) kompozit malzeme için taramalı elektron mikroskobu görüntüleri.

4.2.1.3 KNT2 karbon nanotüp katkılı E-cam lifi/epoksi tabakalı kompozit malzemenin takviye doğrultusunda çekme davranışı

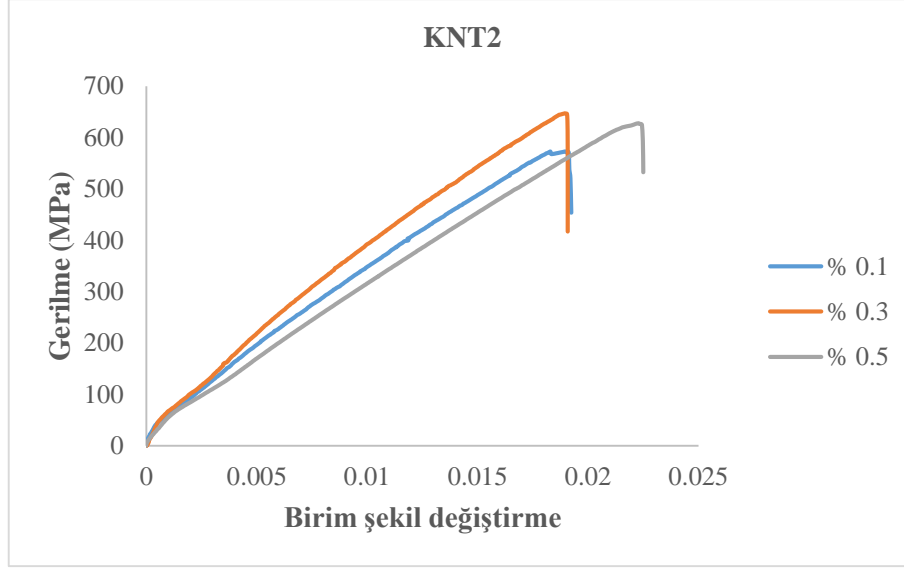
KNT2 karbon nanotüp katkılı numunelerin takviye doğrultusunda yapılan çekme deneyi sonuçları Tablo 4.4'de görülmektedir. Tablo 4.4 incelendiğinde katkısız numune değerlerine göre çekme mukavemeti azalmıştır. Çekme mukavemetinde en büyük azalma % 0.1 oranında görülmüştür. Katkısız numune ile kıyaslandığında % 0.1, 0.3 ve 0.5 oranlarında çekme mukavemetinde sırasıyla % 11.90, 5.07 ve 6.17 azalma meydana

gelmiştir. Elastisite modülü ise % 0.1 oranı için % 1.69 azalmış, % 0.3 oranında % 16.01 artmış ve % 0.5 oranında % 6.26 olarak tekrar azalmıştır. Poisson oranı ise tüm oranlar için artmakla birlikte maksimum artış % 0.5 oranında görülmüştür. Katkısız numuneye göre % 0.1, 0.3 ve 0.5 oranlarında sırasıyla % 4.17, 12.5 ve 16.67 artmıştır.

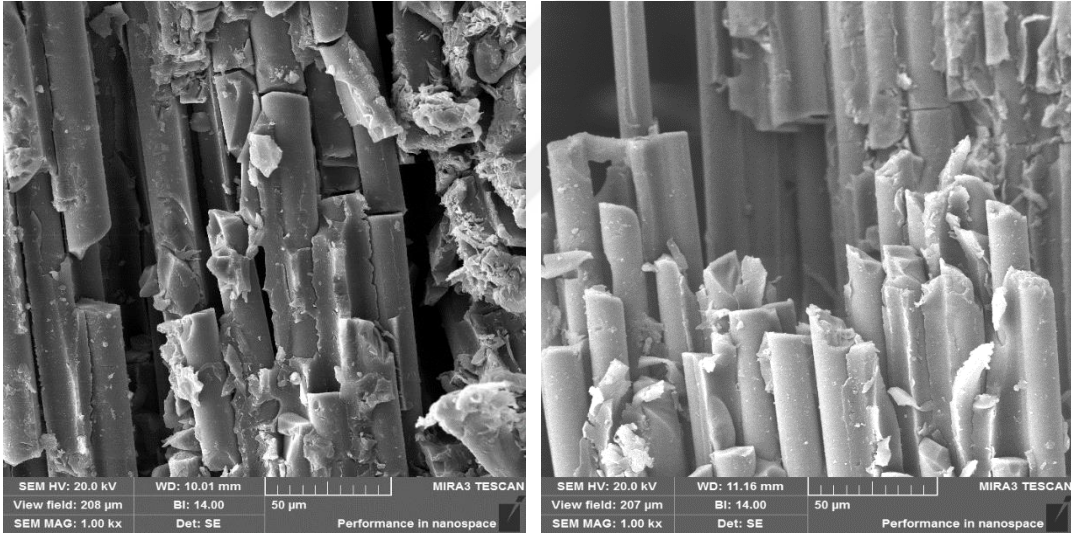
Şekil 4.4’de ise KNT2 karbon nanotüp katkılı kompozit malzemenin her bir oranı için gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri görülmektedir. Seçilen test örneklerine göre % 0.1 oranında diğer oranlara göre malzemenin taşıyabildiği maksimum yük oldukça azalmış ve dolayısıyla gerilme de azalmıştır. Diğer iki oran için malzeme yaklaşık olarak aynı miktarda yük taşımıştır. Her üç oran için eğri karakteristikleri birbirine benzemektedir. Ayrıca % 0.1 ve 0.3 oranlarında neredeyse aynı miktarda uzama olurken, en fazla uzama % 0.5 oranında meydana gelmiştir.

Tablo 4.4 KNT2 katkılı kompozit malzemelerin takviye doğrultusunda çekme özellikleri.

Numune Adı	Deney No	Ortalama alan (mm ²)	Maksimum yük (N)	Çekme mukavemeti (MPa)	Elastisite modülü (GPa)	Poisson oranı
KNT2 % 0.1	1	18.17	9974.21	548.94	32.57	0.25
	2	17.98	10797.90	600.55	33.43	
	3	18.02	10967.40	608.62	34.77	
	4	18.41	10548.90	573.00	31.09	
	5	18.79	10787.20	574.09	31.44	
Ortalama				581.04	32.66	
Standart sapma				23.90	1.50	
KNT2 % 0.3	1	17.55	10583.70	603.06	38.97	0.27
	2	17.56	10705.10	609.63	39.11	
	3	18.45	11539.50	625.45	38.87	
	4	17.94	11615.30	647.45	38.49	
	5	18.43	11880.20	644.61	37.28	
Ortalama				626.04	38.54	
Standart sapma				20.01	0.74	
KNT2 % 0.5	1	17.92	11247.10	627.63	30.03	0.28
	2	17.98	11328.10	630.04	29.55	
	3	17.88	11548.50	645.89	32.67	
	4	17.89	10484.50	586.05	30.19	
	5	17.73	10720.20	604.64	33.28	
Ortalama				618.85	31.14	
Standart sapma				23.51	1.70	



Şekil 4.4 Ağırlıkça farklı oranlardaki KNT2 katkılı kompozit malzemelerin takviye doğrultusunda gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri.

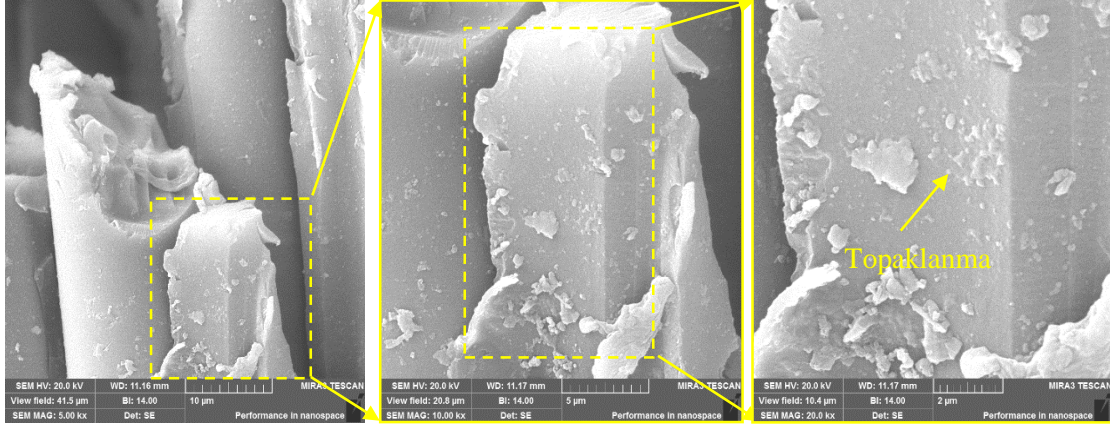


a)

b)

Şekil 4.5 a) Katkısız **b)** KNT2 katkılı (% 0.3 oranı) kompozit malzeme için taramalı elektron mikroskobu görüntüleri.

Şekil 4.5’de katkısız ve KNT2 katkılı kompozit malzemenin çekme testi sonucunda kırılma şekline ait taramalı elektron mikroskobu görüntüleri görülmektedir. Her iki numunede fiber kırılmaları birbirine benzemektedir. Ayrıca Şekil 4.6’da KNT2 adlı karbon nanotüp içeren kompozit malzemeye ait nanotüp dağılımı verilmiştir. Burada nanotüp dağılımının uniform olmadığı ve topaklanmaların olduğu bölgeler görülmektedir. Bu topaklanmalar karbon nanotüp etkisini sınırlayarak çekme dayanımını azaltıcı etki yaratmıştır.



Şekil 4.6 KNT2 katkılı (% 0.3 oranı) kompozit malzeme için nanotüp dağılımını içeren taramalı elektron mikroskobu görüntüleri.

4.2.1.4 KNT3 karbon nanotüp katkılı E-cam lifi/epoksi tabakalı kompozit malzemenin takviye doğrultusunda çekme davranışı

KNT3 karbon nanotüp katkılı numunelerin takviye doğrultusunda yapılan çekme deneyi sonuçları Tablo 4.5’de görülmektedir. Tablo 4.5’e göre katkısız numuneye göre her bir oranda çekme mukavemeti azalmıştır. Maksimum azalma % 0.5 oranında meydana gelmiştir. Katkısız numune ile kıyaslandığında % 0.1, 0.3 ve 0.5 oranlarında çekme mukavemetinde sırasıyla % 9.96, 8.56 ve 22.05 düşüş meydana gelmiştir. Elastisite modülü ise katkısız numune ile kıyaslandığında % 0.1, 0.3 ve 0.5 oranlarında sırasıyla % 5.36, 3.70 ve 8.25 azalmıştır. Poisson oranı ise her bir oran için artmıştır. % 0.1 ve 0.5 oranlarında aynı artış (% 12.5) meydana gelirken, % 0.3 oranında maksimum artış (% 16.67) olmuştur.

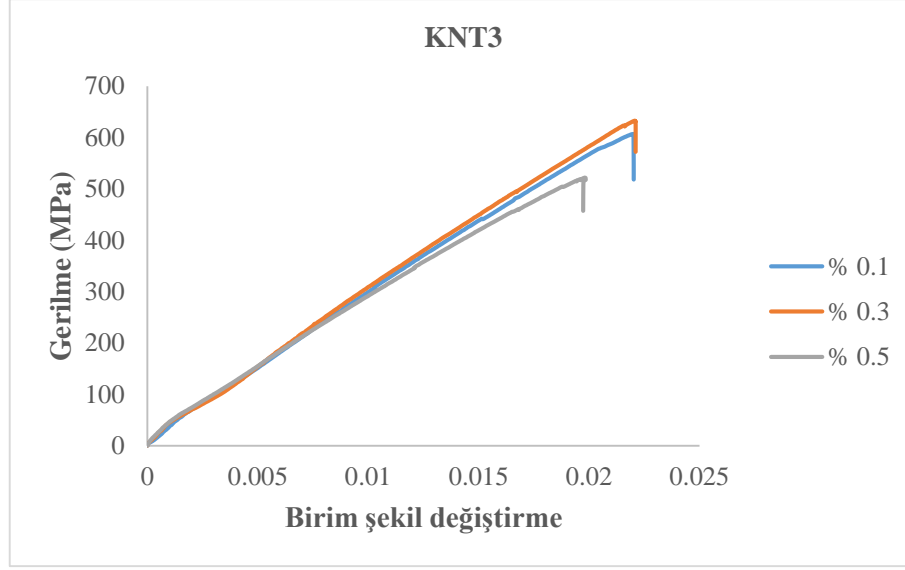
Literatürde yapılan çalışmalarda, Garg vd., (2015) E-cam lifi/epoksi tabakalı kompozit malzemeye fonksiyonlaştırılmış çok duvarlı karbon nanotüp ekleyerek çekme dayanımının % 15 ve elastisite modülünün % 14 azaldığını bulmuşlardır. Jia vd., (2013) cam fiber/epoksi içerisine fonksiyonlaştırılmış çok duvarlı karbon nanotüp ekleyerek çekme dayanımını % 9.3 ve elastisite modülünü % 8.5 artırmışlardır. Khosravi ve Eslami-Farsani (2015) bazalt fiber/epoksi kompozit malzemelere fonksiyonlaştırılmış çok duvarlı karbon nanotüp ekleyerek çekme dayanımını % 12 ve Young modülünü % 21 artırmışlardır. Kim vd., (2012) karbon fiber/epoksi kompozit malzemeye fonksiyonlaştırılmış çok duvarlı karbon nanotüp ilave ederek çekme mukavemetinin % 3 ve modülün % 8 arttığını tespit etmişlerdir. Rahman vd., (2015) E-cam lifi/epoksi

kompozit malzemeye fonksiyonlaştırılmış çok duvarlı karbon nanotüp ekleyerek çekme dayanımını % 21 ve elastisite modülünü % 18 artırmışlardır. Sharma ve Shukla (2014) fonksiyonlaştırılmış çok duvarlı karbon nanotüp içeren karbon fiber/epoksi tabakalı kompozit malzemenin çekme mukavemeti ve Young modülünün sırasıyla % 52 ve % 49 arttığını, Poisson oranının ise değişmeden sabit kaldığını bulmuşlardır.

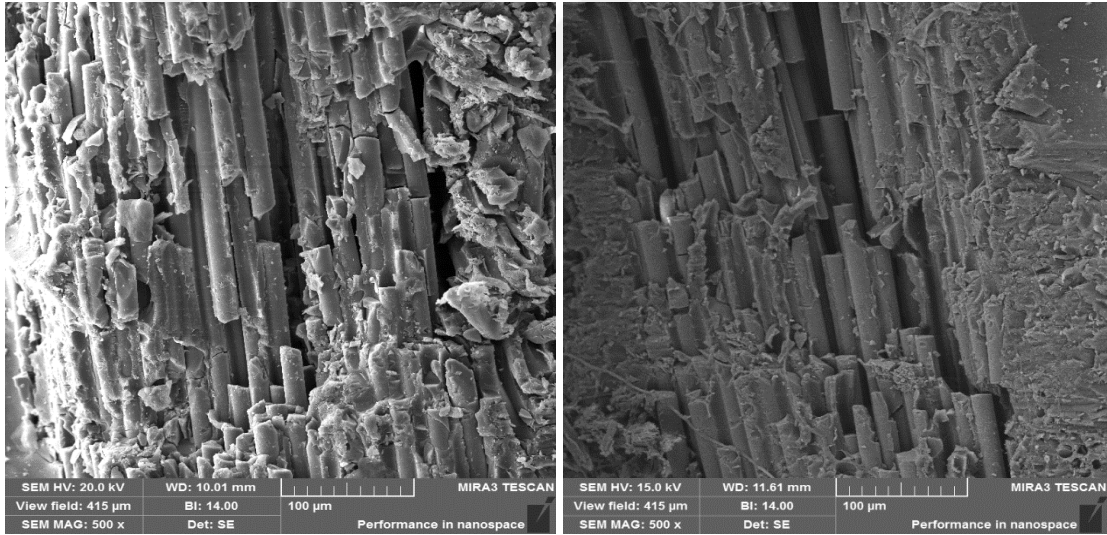
Şekil 4.7’de ise KNT3 karbon nanotüp katkılı kompozit malzemenin her bir oranı için gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri karşılaştırmalı olarak görülmektedir. Seçilen test örneklerine göre maksimum yükü % 0.3 oranını içeren kompozit malzeme taşırken, minimum yükü % 0.5 oranına sahip kompozit malzeme taşımıştır. Doğruların eğimleri incelendiğinde, her bir oran için eğimler hemen hemen aynı kalmıştır. % 0.1 ve 0.3 oranlarında aynı miktarda uzama olurken, % 0.5 oranında daha az uzama meydana gelmiştir.

Tablo 4.5 KNT3 katkılı kompozit malzemelerin takviye doğrultusunda çekme özellikleri.

Numune Adı	Deney No	Ortalama alan (mm ²)	Maksimum yük (N)	Çekme mukavemeti (MPa)	Elastisite modülü (GPa)	Poisson oranı
KNT3 % 0.1	1	17.66	10717.40	606.87	30.03	0.27
	2	17.89	10690.90	597.59	30.02	
	3	17.87	10376.40	580.66	33.25	
	4	17.60	10346.40	587.86	31.48	
	5	18.01	10734.50	596.03	32.42	
Ortalama				593.80	31.44	
Standart sapma				9.98	1.44	
KNT3 % 0.3	1	17.63	10343.20	586.68	31.20	0.28
	2	17.71	10323.10	582.90	31.95	
	3	17.66	11187.30	633.48	32.80	
	4	18.03	11413.60	633.03	32.28	
	5	17.82	10322.80	579.28	31.71	
Ortalama				603.07	31.99	
Standart sapma				27.68	0.60	
KNT3 % 0.5	1	18.84	9636.05	511.47	29.68	0.27
	2	18.51	9659.23	521.84	30.48	
	3	18.51	9655.38	521.63	32.36	
	4	18.46	9595.12	519.78	30.04	
	5	18.71	9276.01	495.78	29.84	
Ortalama				514.10	30.48	
Standart sapma				11.08	1.09	



Şekil 4.7 Ağırlıkça farklı oranlardaki KNT3 katkıli kompozit malzemelerin takviye doğrultusunda gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri.



Şekil 4.8 a) Katkısız **b)** % 0.3 oranında KNT3 içeren kompozit malzeme için taramalı elektron mikroskobu görüntüleri.

Şekil 4.8’de katkısız ve KNT3 katkıli numunenin çekme testi sonucunda kopma haline ait taramalı elektron mikroskobu görüntüleri görülmektedir. Katkısız numune ile karşılaştırıldığında her iki kırılma yüzeyi birbirleriyle benzerlik göstermiştir. Çekme yükü esnasında KNT3 katkıli kompozit malzemede kopan fiberlerin daha pürüzsüz bir yüzeyi olduğu ve fiberlerin matristen kolayca sıyrıldığı görülmektedir. Bu nedenle fiber-matris arayüz bağlanmasının zayıf olduğu düşünülmektedir.

4.2.1.5 Nanokil katkılı E-cam lifi/epoksi tabakalı kompozit malzemenin takviye doğrultusunda çekme davranışı

Nanokil katkılı numunelerin takviye doğrultusunda yapılan çekme deneyi sonuçları Tablo 4.6'de görülmektedir. Tablo 4.6 incelendiğinde her bir oran için çekme mukavemeti azalmıştır. Çekme mukavemetinde maksimum azalma % 0.5 oranında görülmüştür. Katkısız numune ile kıyaslandığında % 1, 3 ve 5 oranlarında çekme mukavemetinde sırasıyla % 16.51, 12.59 ve 24.70 azalma meydana gelmiştir. Nanokil katkılı kompozit malzemelerin elastisite modülü ise oran arttıkça azalmıştır. Elastisite modülü katkısız numuneye göre % 1, 3 ve 5 oranlarında sırasıyla % 2.98, 5.72 ve 17.43 düşmüştür. Nanokil katkılı kompozit malzemelerin Poisson oranı ise her bir oran için artmıştır. Katkısız numune baz alındığında % 0.1 oranında % 12.5, % 0.3 ve 0.5 oranlarında ise aynı miktarda (% 16.67) artmıştır.

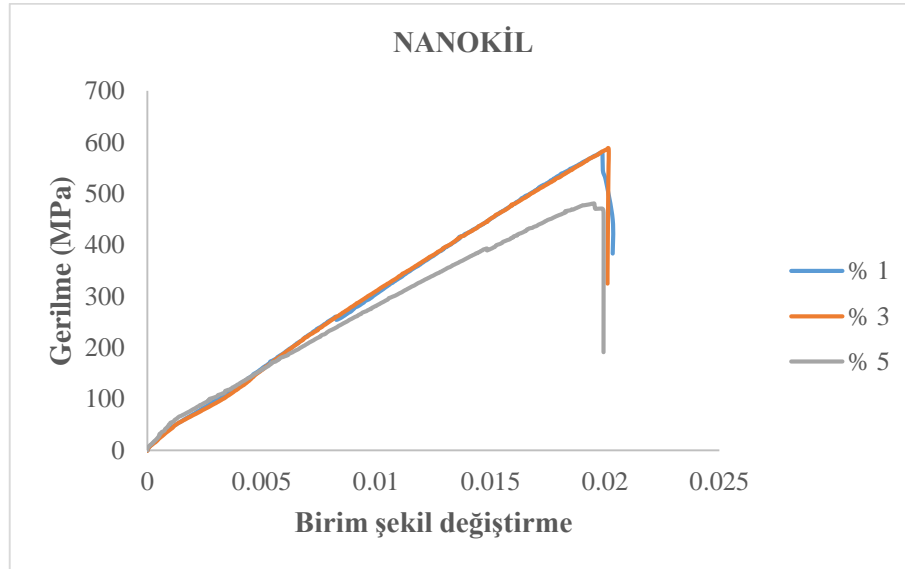
Literatürde Bozkurt vd., (2007) E-cam lifi/epoksi ve Chandradass vd., (2008) E-cam lifi/vinilester tabakalı kompozit malzemeye montmorillonit nanokil ekleyerek çekme dayanımı ve modülünün belli bir orana kadar sabit kaldığını ve daha sonra azaldığını bulmuşlardır. Kanny ve Mohan (2014) nanokil takviyeli E-cam lifi/epoksi kompozit malzemenin çekme dayanımını % 9 ve elastisite modülünü % 21 artırmışlardır. Karippal vd., (2011) cam fiber/epoksi tabakalı kompozit malzemeye nanokil ilave ederek çekme mukavemetinin % 30 ve Young modülünün % 38 iyileştirdiğini bulmuşlardır. Tsai vd., (2008) nanokil takviyeli E-cam fiber/epoksi kompozit malzemenin çekme dayanımının % 12.17 azaldığını, elastisite modülünün ise % 5.93 arttığını tespit etmişlerdir.

Şekil 4.9'da ise nanokil katkılı kompozit malzemenin her bir oranı için gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri görülmektedir. Seçilen test örneklerine göre % 1 ve 3 oranlarında kompozit malzeme neredeyse aynı miktarda maksimum yük taşımıştır. % 5 oranında ise malzemenin taşıyabildiği yük oldukça azalmıştır. Ayrıca tüm oranlar için neredeyse aynı miktarda uzamalar meydana gelmiştir.

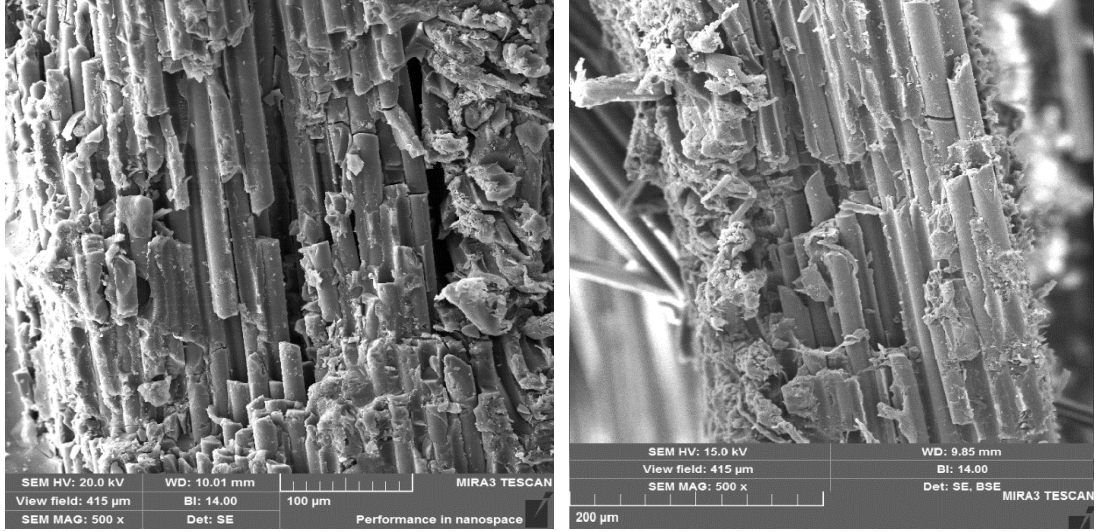
Şekil 4.10'da katkısız ve nanokil katkılı kompozit malzemelerin taramalı elektron mikroskobu görüntüleri görülmektedir. Her iki numune için kırılma yüzeyleri birbirinden farklılık göstermektedir. Nanokilin nem tutması nedeniyle polimerle karışımı esnasında tam bir dağılım sağlanamadığı, matrisle oldukça yüksek oranlarda nanokil eklenmesinin viskozite artışına neden olduğu ve malzemedeki hasarın daha büyük olduğu düşünülmektedir.

Tablo 4.6 Nanokil katkılı kompozit malzemelerin takviye doğrultusunda çekme özellikleri.

Numune Adı	Deney No	Ortalama alan (mm ²)	Maksimum yük (N)	Çekme mukavemeti (MPa)	Elastisite modülü (GPa)	Poisson oranı
Nanokil % 1	1	17.87	9902.08	554.12	34.02	0.27
	2	17.95	9538.67	531.40	31.12	
	3	17.55	9470.43	539.63	31.07	
	4	17.70	10279.70	580.77	31.89	
	5	17.73	9702.29	547.22	33.04	
Ortalama Standart sapma				550.63 18.86	32.23 1.28	
Nanokil % 3	1	19.18	10382.80	541.33	30.67	0.28
	2	18.90	12038.40	636.95	31.76	
	3	19.00	10621.20	559.01	29.02	
	4	18.78	11058.00	588.82	32.74	
	5	18.80	10455.70	556.15	32.4	
Ortalama Standart sapma				576.45 37.96	31.32 1.51	
Nanokil % 5	1	21.84	10770.50	493.15	27.79	0.28
	2	22.77	11448.50	502.79	28.26	
	3	23.16	11304.50	488.10	26.38	
	4	21.89	10535.40	481.29	26.14	
	5	23.03	11921.30	517.64	28.58	
Ortalama Standart sapma				496.59 14.14	27.43 1.11	



Şekil 4.9 Ağırlıkça farklı oranlardaki nanokil katkılı kompozit malzemelerin takviye doğrultusunda gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri.



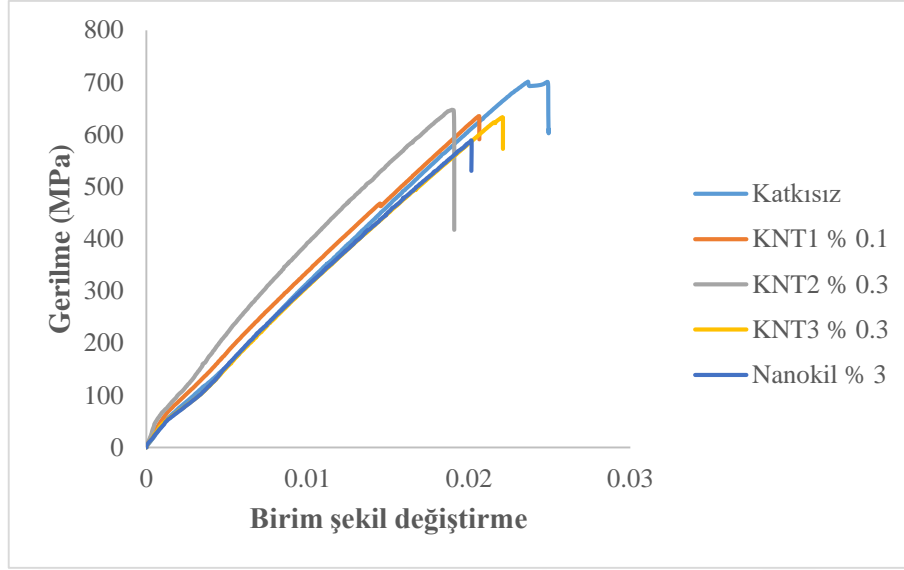
a)

b)

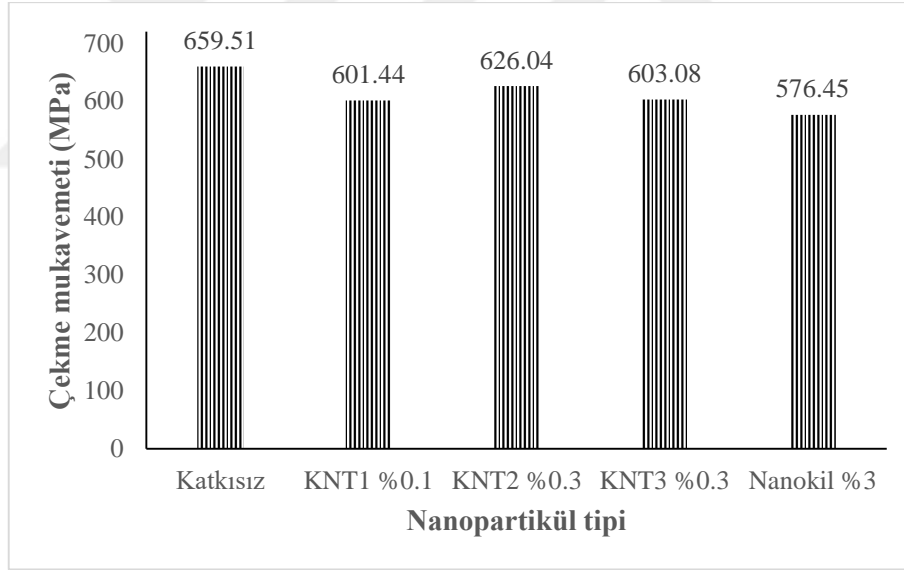
Şekil 4.10 a) Katkısız **b)** Nanokil katkılı (% 3 oranı) kompozit malzeme için taramalı elektron mikroskobu görüntüleri.

4.2.1.6 Nanopartikül katkılı kompozit malzemelerin takviye doğrultusunda çekme mukavemetlerinin karşılaştırılması

Şekil 4.11’de katkısız ve nanopartikül katkılı kompozit malzemelerin en iyi özellikleri gösteren oranlarına ait gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri görülmektedir. Katkısız numune baz alındığında hem karbon nanotüp (KNT1, KNT2 ve KNT3) hem de nanokil takviyesi kompozit malzemenin mukavemetini azaltmıştır. Katkısız numune hem gerilme hem de birim şekil değiştirme açısından nanopartikül takviyeli numunelere göre maksimum özellikler göstermiştir. Şekil 4.12’de ise katkısız ve en iyi özellikleri gösteren oranlara sahip tüm nanopartiküller sütun grafik olarak verilmiştir. Şekil 4.12’ye göre tüm nanopartikül tipleri için çekme mukavemeti azalmıştır. Minimum azalma KNT2 adlı karbon nanotüp (% 0.3 oranında) ve maksimum azalma ise nanokil (% 3 oranında) içeren kompozit malzemede görülmüştür. Elde edilen sonuçlara göre matrise nanopartikül (hem karbon nanotüp hem de nanokil) ilavesinin takviye doğrultusunda çekme mukavemetine negatif yönde etkisi olduğu tespit edilmiştir. Takviye doğrultusunda yapılan çekme testlerinden çıkan sonuçlar anlamlıdır. Çünkü takviye doğrultusunda çekme özelliklerinde fiber baskındır. Bu çalışmada ise matris içerisine nanopartikül takviyesi yapılarak matrisin özellikleri ve fiber-matris arayüz yapışması iyileştirilmeye çalışılmıştır. Sonuç olarak takviye doğrultusunda çekme testi sırasında fiberleri birarada tutan matrisin nanopartikülle takviye edilmesi mukavemetin düşmesine neden olmuştur.



Şekil 4.11 Katkısız ve nanopartikül katkıli kompozit malzemelerin takviye doğrultusunda gerilme birim şekil değiştirme grafikleri.



Şekil 4.12 Katkısız ve nanopartikül katkıli kompozit malzemelerin takviye doğrultusunda çekme mukavemetlerinin karşılaştırılması.

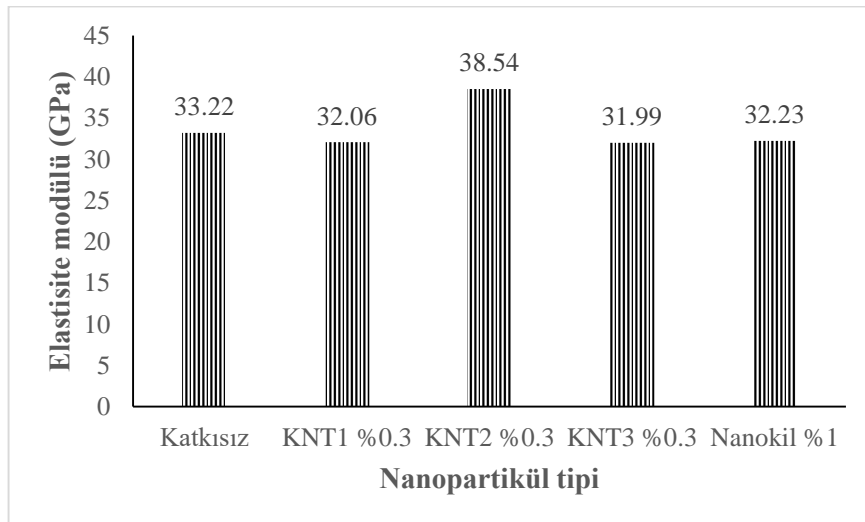
4.2.1.7 Nanopartikül katkıli kompozit malzemelerin takviye doğrultusunda elastisite modüllerinin karşılaştırılması

Şekil 4.13'de katkısız ve nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin elastisite modülleri görülmektedir. Şekilde verilen her bir nanopartikül takviye doğrultusunda çekme testi sonucuna göre en iyi çıkan oranı ile temsil edilmiştir. Elastisite modülü,

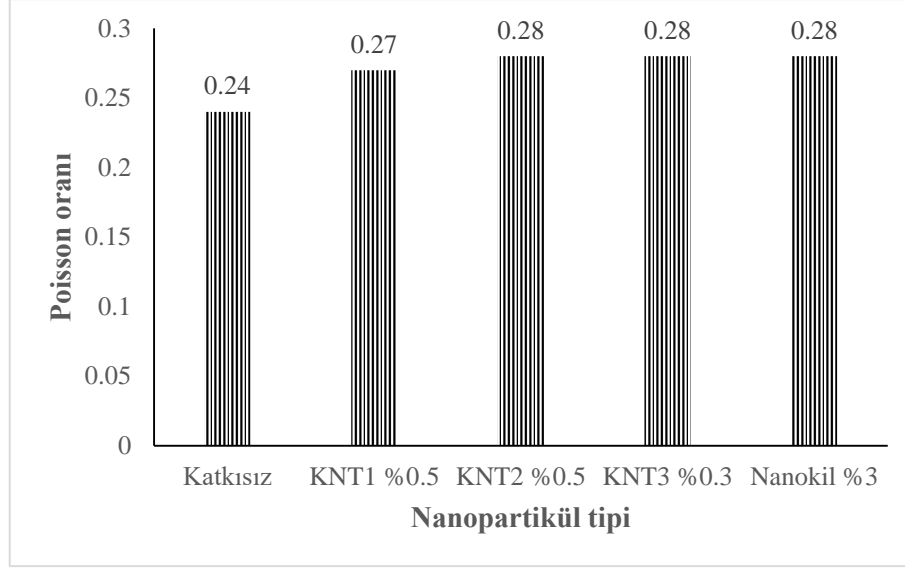
KNT2 adlı karbon nanotüp hariç diğer nanopartiküller için azalmıştır. KNT2 adlı karbon nanotüpte kayda değer bir artış meydana gelmiştir. KNT1, KNT3 adlı karbon nanotüpler ve nanokil için değerler birbirine çok yakındır ve katkısızza göre oldukça az miktarda düşmüştür. Elastisite modülü bir malzemenin rijitliğinin göstergesidir ve matrise nanopartikül takviyesinin rijitliği genel olarak azalttığı görülmüştür. Sadece KNT2 adlı karbon nanotüp içeren kompozit malzemede (% 0.3 oranında) rijitlikte artışa neden olmuştur. KNT2 adlı karbon nanotüp, çapı küçük ve boyu uzun olandır.

4.2.1.8 Nanopartikül katkılı kompozit malzemelerin takviye doğrultusunda major Poisson oranlarının karşılaştırılması

Şekil 4.14’de katkısız ve nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin major Poisson oranları görülmektedir. Her bir nanopartikül için takviye doğrultusunda çekme testi sonucunda en büyük çıkan oranlar ele alınmıştır. Katkısız numuneye göre tüm nanopartiküller için Poisson oranı artmıştır. Bu artış KNT2, KNT3 ve nanokil içeren kompozit malzemelerde aynıken, KNT1 için biraz daha azdır. Poisson oranı çekme testi esnasında malzemedeki yanal şekil değiştirmenin aksel şekil değiştirmeye oranını ifade etmektedir. Sonuçlara göre çekme yükü esnasında malzemede yanal deformasyonlar daha fazla artmıştır ve nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin Poisson oranında artış sağlanmıştır.



Şekil 4.13 Katkısız ve nanopartikül katkılı kompozit malzemelerin takviye doğrultusunda elastisite modüllerinin karşılaştırılması.



Şekil 4.14 Katkısız ve nanopartikül katkılı kompozit malzemelerin takviye doğrultusunda Poisson oranlarının karşılaştırılması.

4.2.2 Takviyeye dik doğrultuda çekme testleri

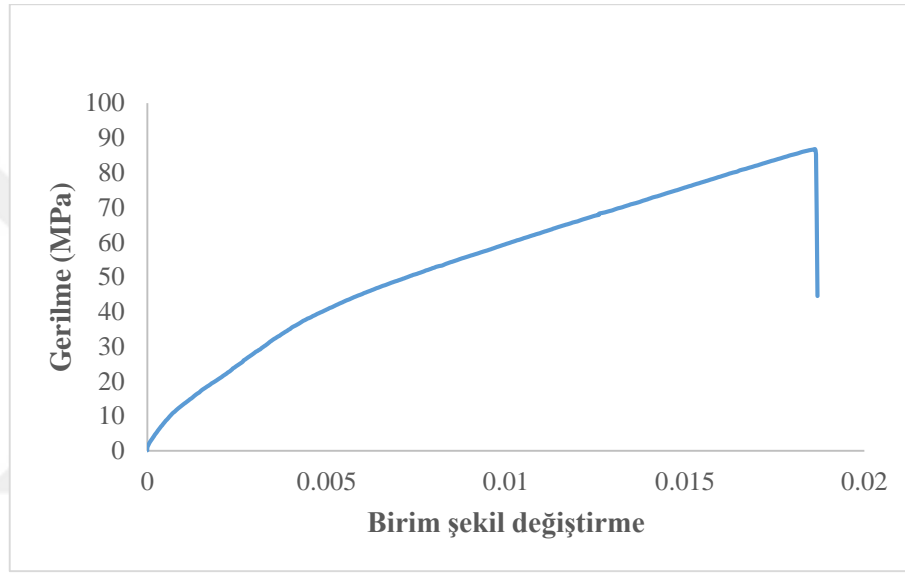
Bu çalışmada tek yönlü lif takviyeli $[90]_8$ oryantasyona sahip kompozit malzemeler kullanılmıştır. ASTM D3039 standardı esas alınarak takviyeye dik doğrultuda çekme testi gerçekleştirilmiştir. Katkısız ve nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin deneyleri beş kez tekrar edilmiş ve bunların ortalaması alınarak standart sapmaları belirlenmiştir. Nanopartikül olarak farklı çap ve uzunluğa sahip olan üç farklı tip karbon nanotüp ve montmorillonit nanokil incelenmiştir. Takviyeye dik doğrultuda çekme testleri sonucunda çekme mukavemeti ve elastisite modülü bulunmuştur.

4.2.2.1 Katkısız E-cam lifi/epoksi tabakalı kompozit malzemenin takviyeye dik doğrultuda çekme davranışı

Katkısız numunelerin takviyeye dik doğrultuda çekme deneyi sonuçları Tablo 4.7'de görülmektedir. Şekil 4.15'de ise katkısız kompozit malzemeye ait gerilme-birim şekil değiştirme grafiği görülmektedir.

Tablo 4.7 Katkısız kompozit malzemenin takviyeye dik doğrultuda çekme özellikleri.

Deney No	Ortalama alan (mm ²)	Maksimum yük (N)	Çekme mukavemeti (MPa)	Elastisite modülü (GPa)
1	60.96	4807.15	78.86	7.42
2	60.37	4950.14	82.00	7.72
3	60.26	5230.08	86.79	7.40
4	60.18	5643.61	93.78	8.08
5	60.66	5044.06	83.15	8.18
Ortalama			84.92	7.76
Standart sapma			5.71	0.36



Şekil 4.15 Katkısız kompozit malzemenin takviyeye dik doğrultuda gerilme-birim şekil değiştirme grafiği.

4.2.2.2 KNT1 karbon nanotüp katkılı E-cam lifi/epoksi tabakalı kompozit malzemenin takviyeye dik doğrultuda çekme davranışı

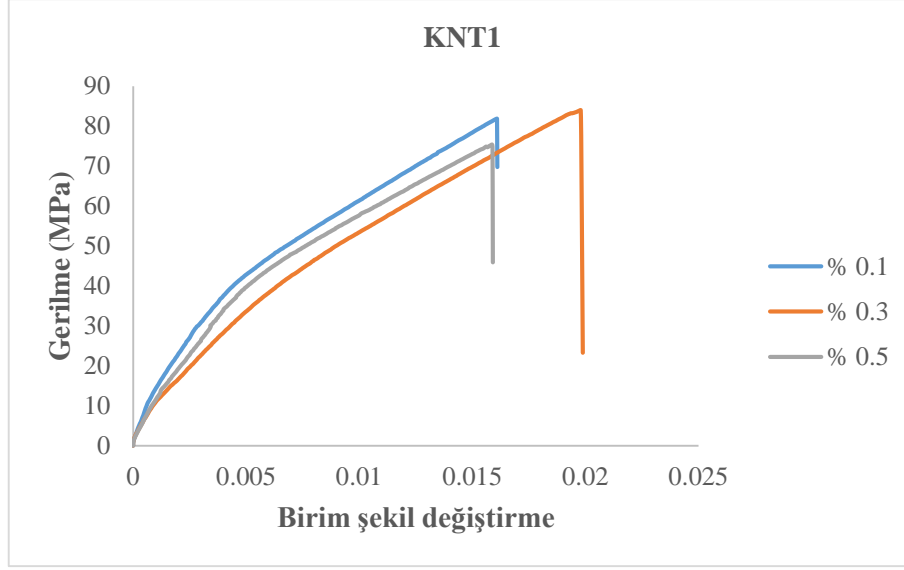
KNT1 karbon nanotüp katkılı numunelerin takviyeye dik doğrultuda yapılan çekme deneyi sonuçları Tablo 4.8’de görülmektedir. Tablo 4.8 incelendiğinde katkısız numuneye göre takviyeye dik doğrultuda çekme mukavemeti azalmıştır. Katkısız numune ile kıyaslandığında % 0.1, 0.3 ve 0.5 oranlarında çekme mukavemetinde sırasıyla % 3.26, 2.01 ve 8.41 azalma meydana gelmiştir. % 0.1 ve 0.3 oranlarında çok fazla bir düşüş olmamakla birlikte % 0.5 oranında diğerlerine göre daha fazla azalma olmuştur. Nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin elastisite modülü ise oran arttıkça artmıştır. Katkısız numuneye göre elastisite modülü % 0.1, 0.3 ve 0.5 oranlarında sırasıyla % 1.03, 2.58 ve 3.87 artmıştır. Maksimum artış % 0.5 oranında meydana gelmiştir.

Şekil 4.16’da ise KNT1 karbon nanotüp katkılı kompozit malzemenin her bir oranı için gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri karşılaştırmalı olarak görülmektedir. Seçilen test örneklerine göre % 0.1 ve 0.3 oranlarında kompozit malzeme hemen hemen aynı miktarda yük taşımaktadır. % 0.5 oranında ise malzemenin üzerine aldığı yük ve dolayısıyla gerilme azalmıştır. Birim şekil değiştirmeler açısından bakıldığında ise maksimum uzamalar % 0.3 oranında görülmüştür. % 0.1 ve 0.5 oranlarında yaklaşık olarak aynı uzamalar meydana gelmiştir.

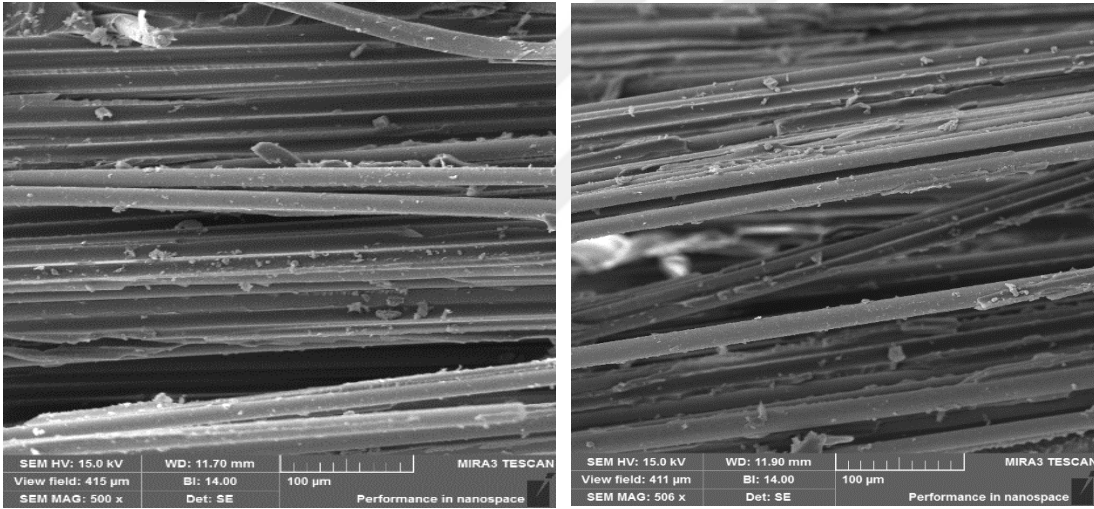
Şekil 4.17’de katkısız ve KNT1 katkılı kompozit malzemenin kırılma yüzeyine ait taramalı elektron mikroskobu görüntüleri görülmektedir. Katkısız numunede fiberlerin oldukça temiz bir ayrılma yüzeyi vardır. Sıyrılan fiber yatağı ve epoksi kalıntıları göze çarpmaktadır. KNT1 adlı karbon nanotüp içeren kompozit malzemede de benzer durum söz konusudur.

Tablo 4.8 KNT1 katkılı kompozit malzemelerin takviyeye dik doğrultuda çekme özellikleri.

Numune Adı	Deneş No	Ortalama alan (mm ²)	Maksimum yük (N)	Çekme mukavemeti (MPa)	Elastisite modülü (GPa)
KNT1 % 0.1	1	61.03	4872.70	79.84	8.42
	2	59.49	5129.32	86.22	7.44
	3	62.59	5336.17	85.26	7.38
	4	61.99	4807.79	77.56	7.32
	5	62.50	5118.08	81.89	8.66
Ortalama Standart sapma				82.15 3.63	7.84 0.64
KNT1 % 0.3	1	60.17	5056.00	84.03	8.47
	2	60.98	5389.12	88.38	7.23
	3	61.88	4976.80	80.43	8.81
	4	62.77	4973.60	79.24	8.03
	5	61.57	5170.92	83.98	7.26
Ortalama Standart sapma				83.21 3.59	7.96 0.71
KNT1 % 0.5	1	64.66	5470.72	84.61	8.25
	2	63.45	4794.33	75.56	7.37
	3	64.91	4892.25	75.37	7.76
	4	64.66	5122.60	79.22	8.24
	5	65.59	4863.28	74.15	8.70
Ortalama Standart sapma				77.78 4.26	8.06 0.51



Şekil 4.16 Ağırlıkça farklı oranlardaki KNT1 katkılı kompozit malzemelerin takviyeye dik doğrultuda gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri.



a)

b)

Şekil 4.17 a) Katkısız b) % 0.3 oranında KNT1 içeren kompozit malzemeye ait taramalı elektron mikroskobu görüntüleri.

4.2.2.3 KNT2 karbon nanotüp katkılı E-cam lifi/epoksi tabakalı kompozit malzemenin takviyeye dik doğrultuda çekme davranışı

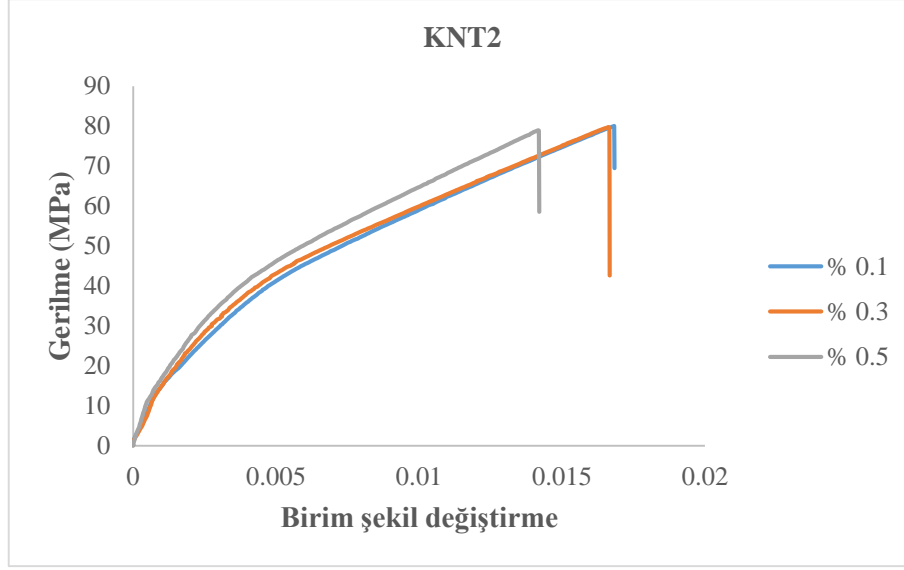
KNT2 karbon nanotüp katkılı numunelerin takviyeye dik doğrultuda yapılan çekme deneyi sonuçları Tablo 4.9'da görülmektedir. Tablo 4.9 incelendiğinde katkısız numuneye göre çekme mukavemeti azalmıştır. Çekme mukavemetinde en büyük azalma % 0.1 oranında görülmüştür. % 0.3 ve 0.5 oranlarında yaklaşık olarak aynı miktarda düşüş meydana gelmiştir. Katkısız numune ile kıyaslandığında % 0.1, 0.3 ve 0.5 oranlarında

çekme mukavemetinde sırasıyla % 5.12, 4.31 ve 4.70 azalma olmuştur. Elastisite modülü ise oran arttıkça artmıştır. Maksimum artış % 0.5 oranında (% 33.25) görülmekle birlikte, % 0.1 oranında % 3.22 ve % 0.3 oranında % 8.76 iyileşme olmuştur.

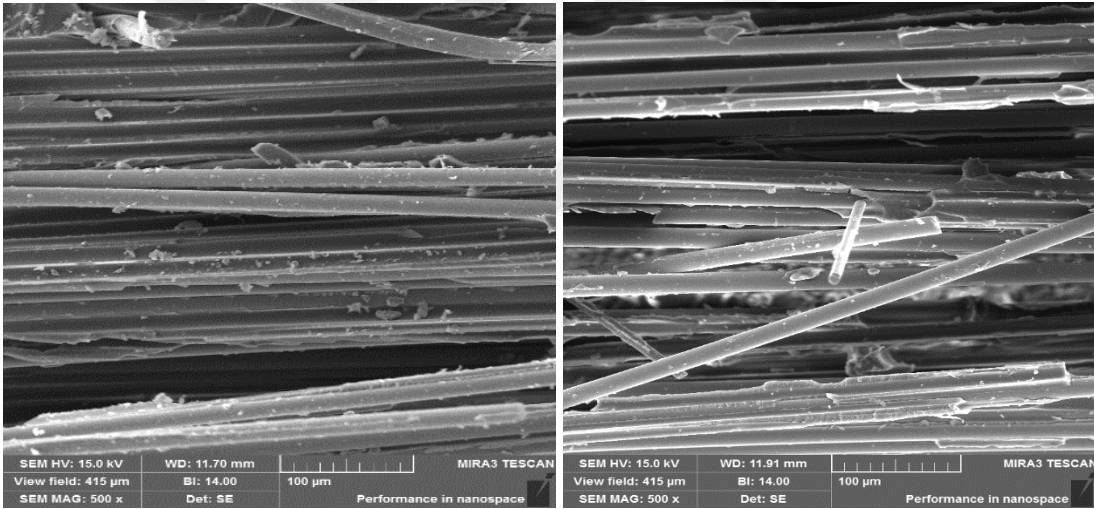
Şekil 4.18’de ise KNT2 karbon nanotüp katkılı kompozit malzemenin her bir oranı için gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri görülmektedir. Seçilen test örneklerine göre tüm oranlar için kompozit malzeme hemen hemen aynı miktarda yük taşımıştır. % 0.1 ve 0.3 oranlarında eğriler neredeyse çakışık. % 0.5 oranını içeren numunenin ise en az uzamaya sahip olduğu görülmektedir.

Tablo 4.9 KNT2 katkılı kompozit malzemelerin takviyeye dik doğrultuda çekme özellikleri.

Numune Adı	Deney No	Ortalama alan (mm ²)	Maksimum yük (N)	Çekme mukavemeti (MPa)	Elastisite modülü (GPa)
KNT2 % 0.1	1	63.34	5071.37	80.07	7.70
	2	63.05	4844.32	76.83	8.25
	3	63.30	5284.79	83.49	7.80
	4	62.58	5297.15	84.65	8.18
	5	63.26	4923.76	77.83	8.12
Ortalama				80.57	8.01
Standart sapma				3.52	0.24
KNT2 % 0.3	1	62.00	5237.77	84.48	9.00
	2	64.85	5172.73	79.76	9.32
	3	64.32	5706.47	88.72	8.84
	4	64.68	4921.82	76.09	7.59
	5	65.88	5089.60	77.26	7.45
Ortalama				81.26	8.44
Standart sapma				5.27	0.86
KNT2 % 0.5	1	64.67	5642.13	87.24	9.68
	2	64.68	5108.80	78.99	10.11
	3	66.53	5090.33	76.51	10.49
	4	64.62	5153.77	79.76	11.03
	5	65.92	5416.55	82.17	10.38
Ortalama				80.93	10.34
Standart sapma				4.06	0.50



Şekil 4.18 Ağırlıkça farklı oranlardaki KNT2 katkıli kompozit malzemelerin takviyeye dik doğrultuda gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri.

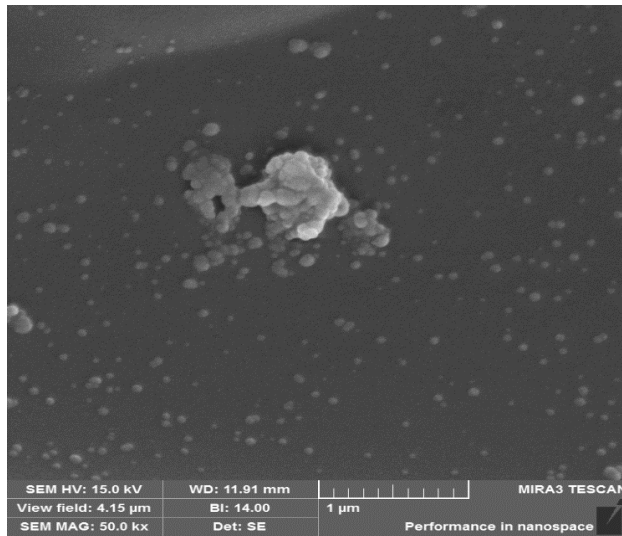
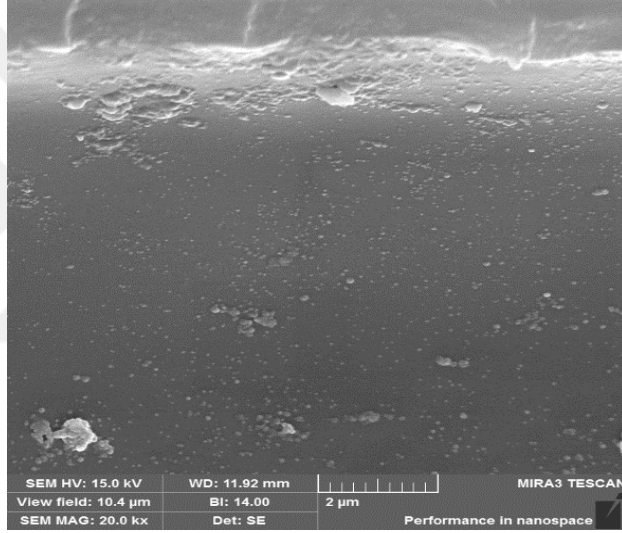
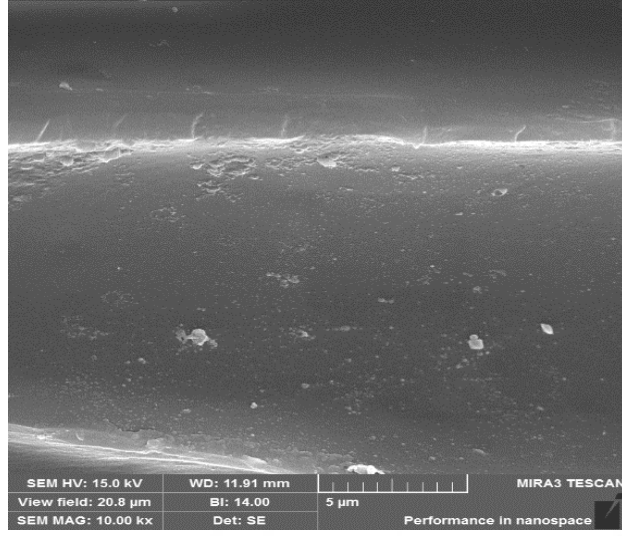


a)

b)

Şekil 4.19 a) Katkısız b) % 0.3 oranında KNT2 içeren kompozit malzemeye ait taramalı elektron mikroskobu görüntüleri.

Şekil 4.19'da katkısız ve KNT2 katkıli kompozit malzemeye ait taramalı elektron mikroskobu görüntüleri görülmektedir. Şekil 4.20'de ise KNT2 adlı karbon nanotüpüne ait fiber yüzeyindeki nanotüp dağılımı ve topaklanması görülmektedir. Matris içerisinde nanotübün düzgün dağılmaması nanotüp-matris etkileşimini azaltmış ve mukavemetin azalmasına neden olmuştur.



Şekil 4.20 KNT2 katkıli kompozit malzemede nanopartikül dağılımı ve topaklanmalara ait taramalı elektron mikroskobu görüntüleri.

4.2.2.4 KNT3 karbon nanotüp katkılı E-cam lifi/epoksi tabakalı kompozit malzemenin takviyeye dik doğrultuda çekme davranışı

KNT3 karbon nanotüp katkılı numunelerin takviyeye dik doğrultuda yapılan çekme deneyi sonuçları Tablo 4.10'da görülmektedir. Tablo 4.10'a göre katkısız numune ile kıyaslandığında çekme mukavemeti azalmıştır. Maksimum azalma % 0.5 oranına sahip kompozit malzemede meydana gelmiştir. % 0.1 ve 0.3 oranlarını içeren numunelerde ise çekme mukavemeti neredeyse aynı miktarda düşmüştür. Katkısız numune baz alındığında % 0.1, 0.3 ve 0.5 oranlarında çekme mukavemetinde sırasıyla % 7.15, 7.40 ve 10.92 azalma meydana gelmiştir. KNT3 katkılı kompozit malzemelerin elastisite modülü ise KNT1 ve KNT2 adlı nanopartiküllerden farklı bir davranış sergileyerek azalmıştır. Katkısız numuneye göre % 0.1 oranında % 2.32'lik, % 0.3 oranında % 0.77'lik ve % 0.5 oranında ise % 1.93'lük azalma olmuştur.

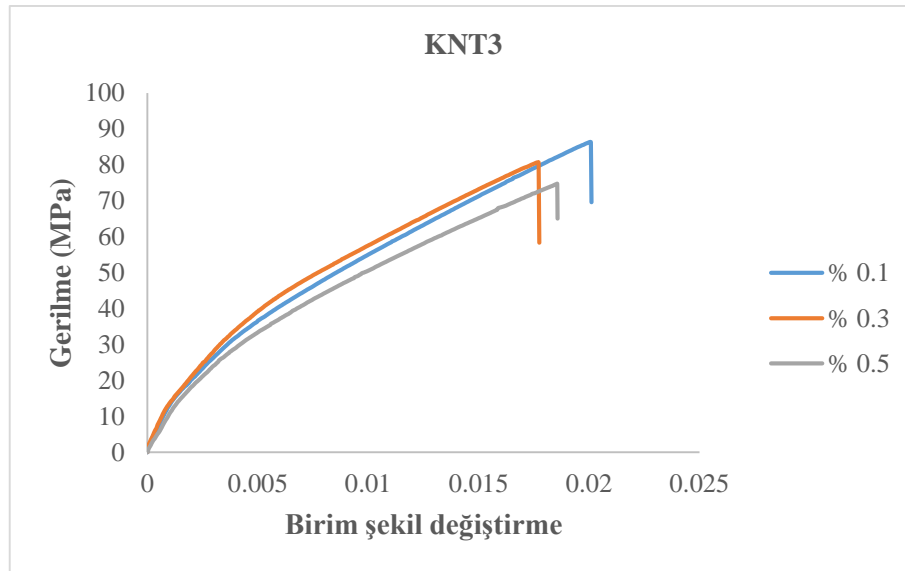
Literatürde Sharma ve Shukla (2014) karbon fiber/epoksi kompozit malzemeye fonksiyonlaştırılmış çok duvarlı karbon nanotüp ekleyerek takviyeye dik doğrultuda elastisite modülünü % 41.24 artırmıştır. Shokrieh vd., (2014) çok duvarlı karbon nanotüp içeren karbon fiber/epoksi kompozitlerin transvers yöndeki elastisite modülünün % 9.02 arttığını bulmuşlardır.

Şekil 4.21'de ise KNT3 karbon nanotüp katkılı kompozit malzemenin her bir oranı için gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri karşılaştırmalı olarak görülmektedir. Seçilen test örneklerine göre kompozit malzeme % 0.1 oranında maksimum yük taşıyorken, % 0.5 oranında minimum yük taşımıştır. Maksimum yükü taşıyan % 0.1 oranına sahip kompozit malzeme birim uzamada da en yüksek değeri göstermiştir. % 0.3 ve 0.5 oranlarındaki malzemelerde ise taşıdığı yük ve birim uzama açısından birbirinin tersi durumlar oluşmuştur.

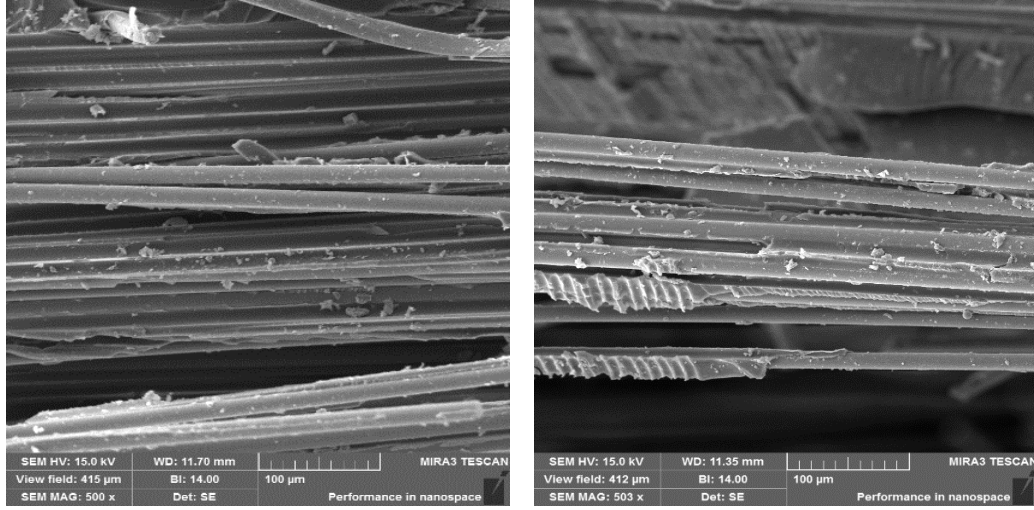
Şekil 4.22'de katkısız ve KNT3 katkılı kompozit malzemelere ait taramalı elektron mikroskobu görüntüleri görülmektedir. KNT3 katkılı kompozit malzemeye ait görüntüler katkısız ile kıyaslandığında fiber üzerinde daha fazla matris artıkları kalmıştır. Bu durum fiber ile matris arasında iyi bir yapışma olduğunu gösterir. Şekil 4.23'te ise KNT3 adlı karbon nanotüp içeren numunenin fiber yüzeyindeki topaklanmalar görülmektedir.

Tablo 4.10 KNT3 katkılı kompozit malzemelerin takviyeye dik doğrultuda çekme özellikleri.

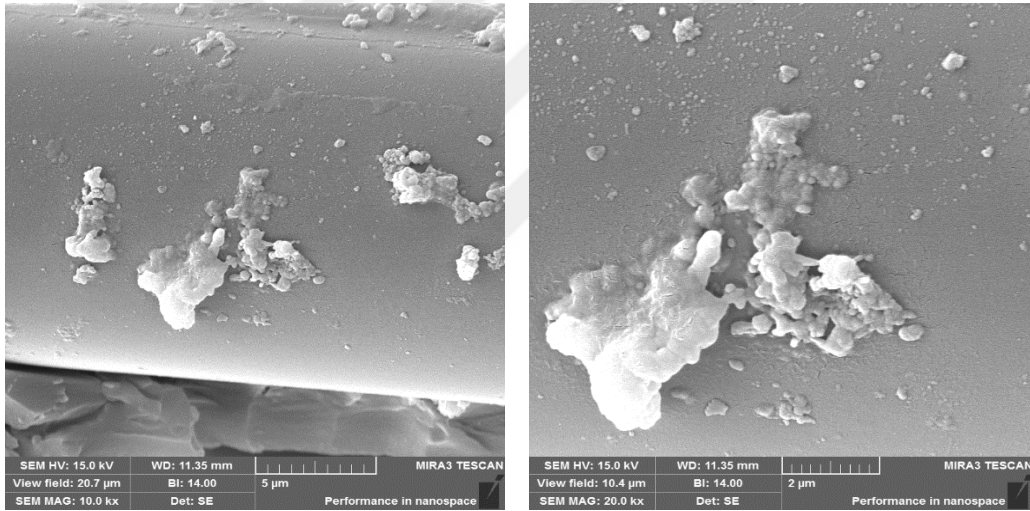
Numune Adı	Deney No	Ortalama alan (mm ²)	Maksimum yük (N)	Çekme mukavemeti (MPa)	Elastisite modülü (GPa)
KNT3 % 0.1	1	64.20	5541.37	86.31	7.16
	2	62.58	5263.90	84.11	7.37
	3	63.27	4862.09	76.85	7.67
	4	62.81	4688.22	74.64	8.20
	5	64.16	4640.56	72.33	7.49
Ortalama				78.85	7.58
Standart sapma				6.07	0.39
KNT3 % 0.3	1	61.54	5209.56	84.65	7.31
	2	63.47	4908.17	77.33	8.78
	3	63.70	5143.80	80.75	7.49
	4	63.80	4790.70	75.09	7.83
	5	63.02	4749.84	75.37	7.08
Ortalama				78.64	7.70
Standart sapma				4.05	0.66
KNT3 % 0.5	1	66.17	4948.90	74.79	7.44
	2	65.40	5268.48	80.56	7.49
	3	65.13	4485.00	68.86	8.33
	4	65.22	4910.12	75.29	7.54
	5	65.45	5152.80	78.73	7.23
Ortalama				75.65	7.61
Standart sapma				4.49	0.42



Şekil 4.21 Ağırlıkça farklı oranlardaki KNT3 katkılı kompozit malzemelerin takviyeye dik doğrultuda gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri.



Şekil 4.22 a) Katkısız **b)** KNT3 katkılı (% 0.1 oranı) kompozit malzemeye ait taramalı elektron mikroskobu görüntüleri.



Şekil 4.23 KNT3 katkılı kompozit malzemenin nanopartikül dağılımı ve topaklanmaları gösteren taramalı elektron mikroskobu görüntüleri.

4.2.2.5 Nanokil katkılı E-cam lifi/epoksi tabakalı kompozit malzemenin takviyeye dik doğrultuda çekme davranışı

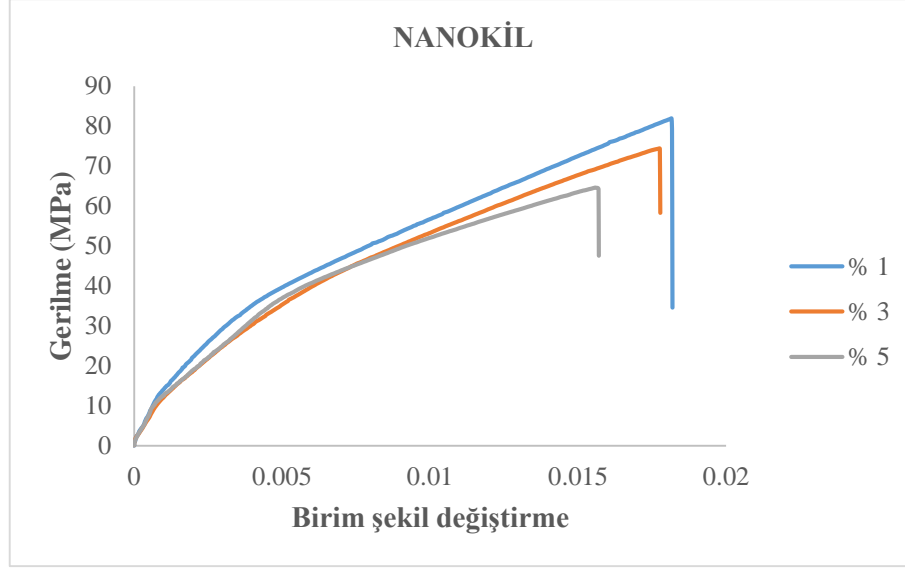
Nanokil katkılı numunelerin takviyeye dik doğrultuda yapılan çekme deneyi sonuçları Tablo 4.11’de görülmektedir. Tablo 4.11’e göre nanopartikül oranı arttıkça çekme mukavemeti azalmıştır. Çekme mukavemetinde maksimum azalma % 0.5 oranını içeren kompozit malzemede görülmüştür. Katkısız numune ile kıyaslandığında % 1, 3 ve 5 oranlarında çekme mukavemetinde sırasıyla % 5.75, 15.93 ve 28.43 çekme mukavemetinde azalma meydana gelmiştir. Nanokil katkılı numunelerin elastisite

modülü % 1 oranında artmıştır (% 2.06). % 3 ve 5 oranlarında ise sırasıyla % 9.92 ve 17.01 düşüş meydana gelmiştir. Literatürde ise Tsai vd., (2008) cam fiber/epoksi kompozite nanokil ilave ederek çekme dayanımını % 74.36 ve elastisite modülünü % 66.92 artırmışlardır.

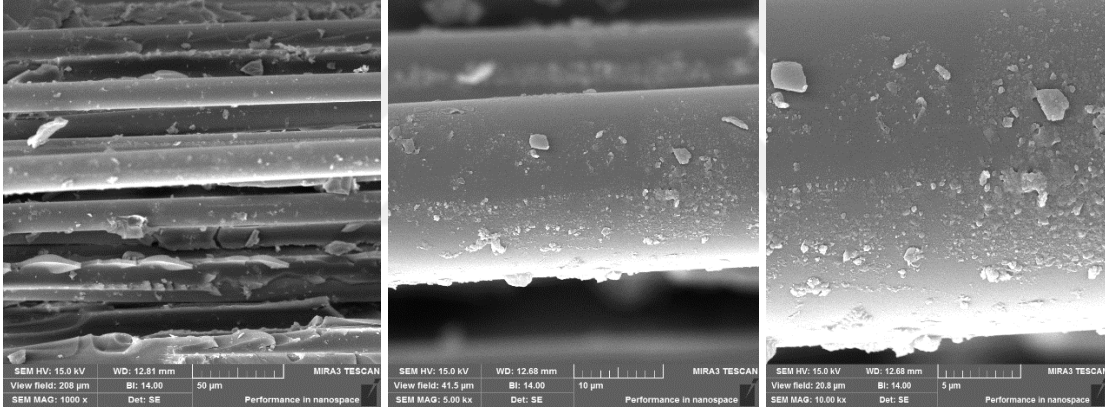
Şekil 4.24’de nanokil katkılı kompozit malzemenin her bir oranı için gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri görülmektedir. Oran artışıyla birlikte malzemenin taşıyabildiği yük azalmış ve dolayısıyla gerilme de azalmıştır. Her üç oran için kompozit malzemelerin gerilme ve birim şekil değiştirme davranışları aynıdır. % 1 oranına sahip numune hem maksimum yükü taşımakta, hem de en büyük uzamaya sahiptir. % 5 oranına sahip malzeme ise hem minimum yükü taşımakta, hem de en küçük uzamaya sahiptir.

Tablo 4.11 Nanokil katkılı kompozit malzemelerin takviyeye dik doğrultuda çekme özellikleri.

Numune Adı	Deney No	Ortalama alan (mm ²)	Maksimum yük (N)	Çekme mukavemeti (MPa)	Elastisite modülü (GPa)
Nanokil % 1	1	63.28	5012.85	79.22	8.67
	2	63.99	5246.07	81.98	8.14
	3	64.16	4919.88	76.68	7.16
	4	64.20	5006.08	77.98	7.03
	5	63.82	5383.87	84.36	8.61
Ortalama				80.04	7.92
Standart sapma				3.11	0.78
Nanokil % 3	1	70.97	5258.99	74.10	7.60
	2	71.47	4949.90	69.26	7.20
	3	72.96	5426.58	74.38	6.55
	4	73.40	5102.79	69.52	7.02
	5	73.18	5099.60	69.69	6.57
Ortalama				71.39	6.99
Standart sapma				2.61	0.44
Nanokil % 5	1	81.84	5188.37	63.40	6.41
	2	84.58	5463.06	64.59	6.47
	3	86.68	4998.59	57.67	6.51
	4	86.75	5006.57	57.71	6.42
	5	87.66	5305.21	60.52	6.37
Ortalama				60.78	6.44
Standart sapma				3.18	0.05



Şekil 4.24 Ağırlıkça farklı oranlardaki nanokil katkıli kompozit malzemelerin takviyeye dik doğrultuda gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri.



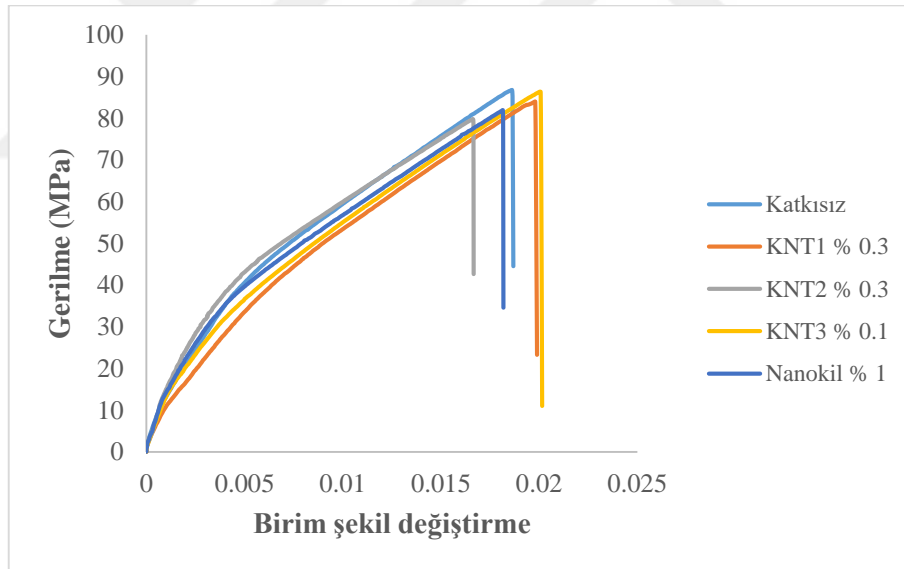
Şekil 4.25 Nanokil katkıli (% 1 oranı) kompozit malzemeye ait taramalı elektron mikroskobu görüntüleri.

Şekil 4.25'te nanokil katkıli kompozit malzemelerin çekme testi sonucunda kırılma yüzeyi görülmektedir. Fiber yüzeyi sırasıyla büyütülerek gösterilmiştir. Fiberlerin üzerinde nanopartiküller ve epoksi artıkları göze çarpmaktadır. Ayrıca bazı yerlerde topaklanmalar da bulunmuştur.

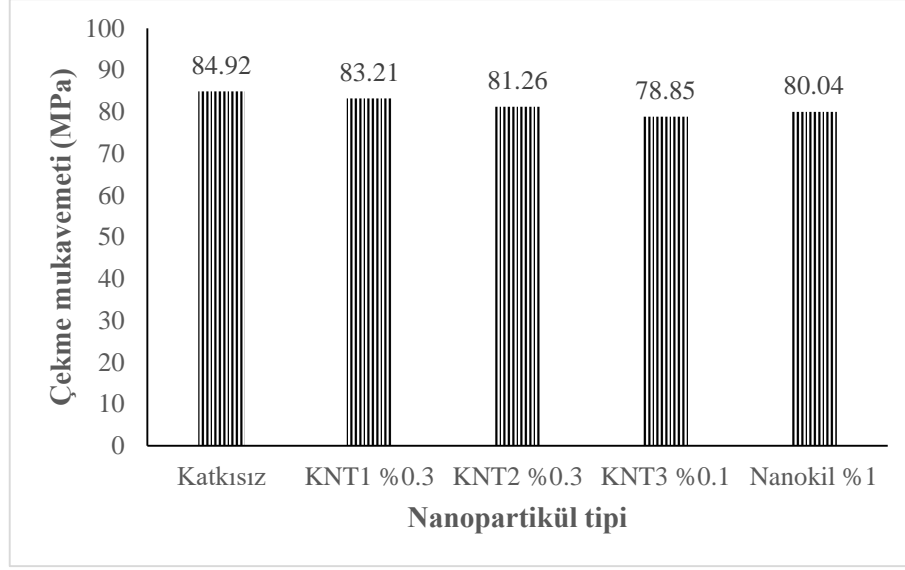
4.2.2.6 Nanopartikül katkıli kompozit malzemelerin takviyeye dik doğrultuda çekme mukavemetlerinin karşılaştırılması

Şekil 4.26'da katkısız ve nanopartikül katkıli kompozit malzemelerin en iyi özellikleri gösteren oranlarına ait gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri görülmektedir. Katkısız

numune baz alındığında hem karbon nanotüp (KNT1, KNT2 ve KNT3) hem de nanokil takviyesi kompozit malzemenin taşıyacağı yükü azaltmıştır. Şekil 4.27’de ise katkısız ve en iyi özellikleri gösteren oranlara sahip tüm nanopartiküller sütun grafik olarak verilmiştir. Şekil 4.27’ye göre tüm nanopartikül tipleri için çekme mukavemeti azalmıştır. Minimum azalma KNT1 adlı karbon nanotüp (% 0.3 oranında) ve maksimum azalma KNT3 adlı karbon nanotüp (% 0.1 oranında) içeren kompozit malzemededir. Takviye doğrultusunda olduğu gibi takviyeye dik doğrultuda yapılan çekme testi sonuçlarında da matrise nanopartikül takviyesinin negatif yönde etkisi olmuştur. Kompozit malzemelerin takviyeye dik doğrultuda çekme özelliklerinde matris baskındır. Bu çalışmada matris içerisine nanopartikül takviyesi yapılarak matris özellikleri iyileştirilmeye çalışılmıştır. Ancak taramalı elektron mikroskobu görüntülerinde de görüldüğü üzere bölgesel topaklanmalar oluşmuş ve bunlar dayanımı düşürmüştür. Ayrıca oran artışıyla birlikte viskozite artması hava kabarcıklarının dışarı çıkmasını engelleyerek boşlukların oluşmasını sağlamıştır.



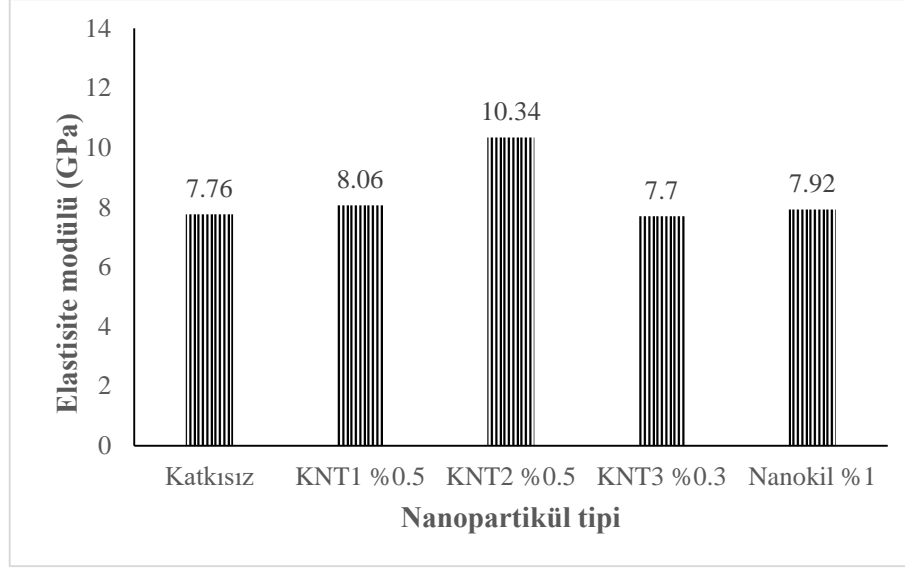
Şekil 4.26 Katkısız ve nanopartikül katkıli kompozit malzemelerin takviyeye dik doğrultuda gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri.



Şekil 4.27 Katkısız ve nanopartikül katkılı kompozit malzemelerin takviyeye dik doğrultuda çekme mukavemetlerinin karşılaştırılması.

4.2.2.7 Nanopartikül katkılı kompozit malzemelerin takviyeye dik doğrultuda elastisite modüllerinin karşılaştırılması

Şekil 4.28’de katkısız ve nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin elastisite modülleri görülmektedir. Şekilde verilen her bir nanopartikül takviyeye dik doğrultuda çekme testi sonucuna göre çıkan en iyi oranı ile temsil edilmiştir. Elastisite modülü, KNT3 adlı karbon nanotüp hariç diğer nanopartiküller için artmıştır. Karbon nanotüpler içerisinde maksimum artış KNT2 katkılı kompozit malzemede meydana gelmiştir. KNT2 adlı karbon nanotüp, ince ve uzun olan nanopartiküldür. KNT3 adlı nanotüpteki azalış ve nanokildeki artış miktarında katkısıza göre çok fazla değişim olmamıştır. Elde edilen sonuçlara dayanarak matrise nanopartikül takviyesinin kalın ve uzun olan KNT3 adlı karbon nanotübün dışında diğer nanopartiküllerde rijitliği artırdığı görülmüştür.



Şekil 4.28 Katkısız ve nanopartikül katkılı kompozit malzemelerin takviyeye dik doğrultuda elastisite modüllerinin karşılaştırılması.

4.3 Iosipescu Düzlem İçi Kayma Testleri

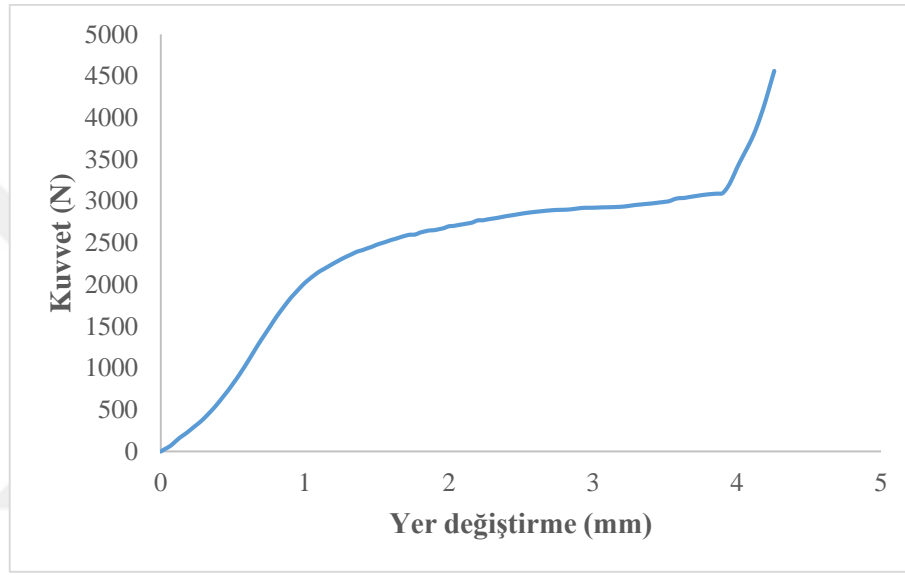
Bu çalışmada tek yönlü lif takviyeli $[0^\circ/90^\circ]_{3S}$ oryantasyona sahip kompozit malzemeler kullanılmıştır. ASTM D5379 standardı esas alınarak düzlem içi kayma testi gerçekleştirilmiştir. Katkısız ve nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin kayma deneyleri beş kez tekrar edilmiştir ve beş değerın ortalaması alınarak standart sapmaları belirlenmiştir. Düzlem içi kayma testleri sonucunda kayma mukavemetleri bulunmuştur.

4.3.1 Katkısız E-cam lifi/epoksi tabakalı kompozit malzemenin kayma davranışı

Katkısız numunelerin kayma deneyi sonuçları Tablo 4.12’de görülmektedir. Şekil 4.29’da ise katkısız kompozit malzemeye ait kuvvet-yer değiştirme grafiği verilmektedir. Bu test vasıtasıyla uygulanan yükün etkisiyle numunenin V çentikleri arasındaki bölgede saf kayma gerilmesi oluşturulmuştur. Ayrıca grafik üç ayrı bölgeye ayrılmıştır. Birinci bölgede yük arttıkça yer değiştirme de artmaktadır. İkinci bölgede çok fazla yük artışı olmamasına karşılık yer değiştirme artarak devam etmektedir. Bunun nedeni rijitliğin azalmasıyla birlikte hasarların artmasıdır. Üçüncü bölgede ise yük artışına karşılık çok az yer değiştirme olmuştur. Basma kafası numuneye birlikte aparata da yük uygulamaya başlamıştır ve kuvvet bu bölgede artmaya devam etmiştir. Bu nedenle üçüncü bölgedeki kuvvetler dikkate alınmamıştır.

Tablo 4.12 Katkısız kompozit malzemenin kayma mukavemeti.

Deney No	Kalınlık (mm)	Genişlik (mm)	Kesit alanı (mm ²)	Maksimum yük (N)	Kayma mukavemeti (MPa)
1	4.33	13.14	56.90	3091.06	54.32
2	4.25	13.21	56.14	3194.89	56.91
3	4.18	13.08	54.67	3032.57	55.47
4	4.16	13.13	54.62	3128.93	57.29
5	4.13	13.19	54.47	3156.50	57.95
Ortalama					56.39
Standart sapma					1.47



Şekil 4.29 Katkısız kompozit malzemenin kuvvet-yer değiştirme grafiği.

4.3.2 KNT1 karbon nanotüp katkılı E-cam lifi/epoksi tabakalı kompozit malzemenin kayma davranışı

KNT1 karbon nanotüp katkılı numunelerin kayma deneyi sonuçları Tablo 4.13'de görülmektedir. Tablo 4.13'e bakılacak olursa katkısız numuneye göre tüm oranlarda kayma mukavemeti azalmıştır. Katkısız numune ile kıyaslandığında % 0.1, 0.3 ve 0.5 oranlarında kayma mukavemetinde sırasıyla % 5.62, 3.97 ve 0.34 düşüş meydana gelmiştir. % 0.5 oranına sahip numunede katkısız numune ile kayma mukavemetinin neredeyse aynı olduğu görülmüştür. Minimum azalma % 0.5 ve maksimum azalma % 0.1 oranına sahip kompozit malzemede oluşmuştur.

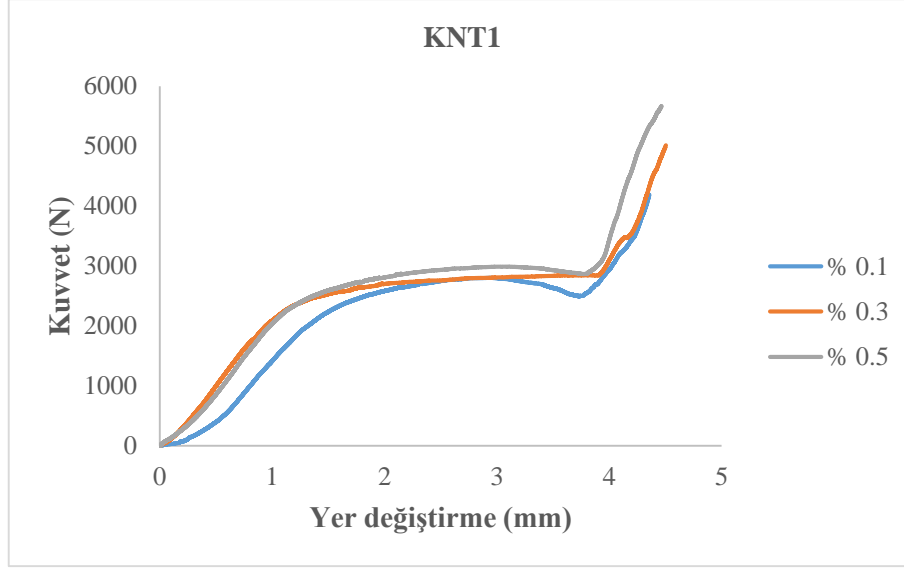
Şekil 4.30'da ise KNT1 karbon nanotüp katkılı kompozit malzemenin her bir oranı için kuvvet-yer değiştirme grafikleri karşılaştırmalı olarak görülmektedir. Seçilen test

örneklerine göre % 0.5 oranına ait kompozit malzeme maksimum yük taşımıştır. % 0.1 ve 0.3 oranlarındaki kompozit malzemeler ise taşıdığı yük açısından birbirine yakın davranış sergilemişlerdir. Üç oran için doğruların eğimlerine bakıldığında başlangıçta % 0.3 ve 0.5 oranlarında neredeyse aynı kalmıştır. Her bir oran için yer değiştirme miktarları karşılaştırıldığında arada çok fazla farkın olmadığı görülmüştür.

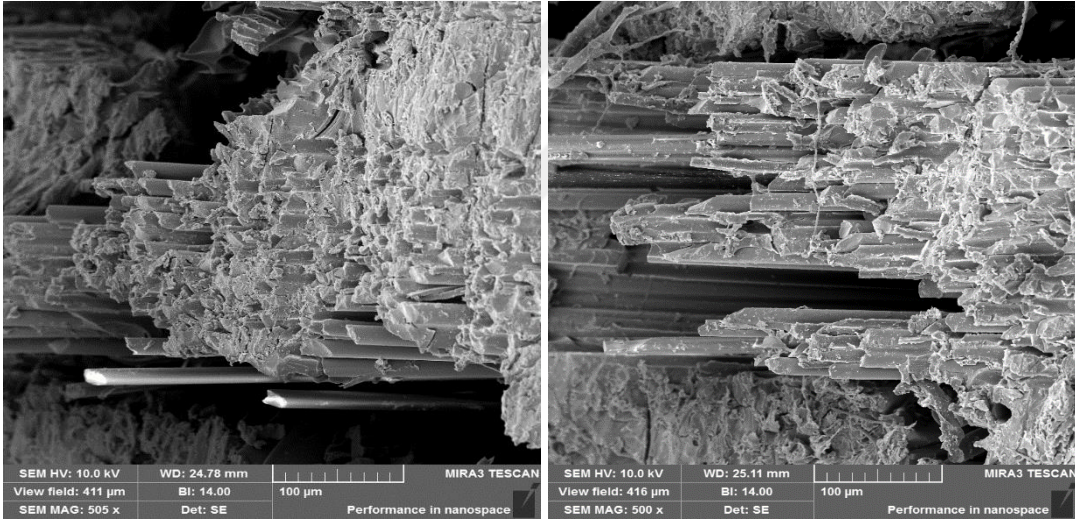
Şekil 4.31’de katkısız ve KNT1 katkılı kompozit malzemenin kayma testi sonucunda kırılma yüzeyine ait taramalı elektron mikroskobu görüntüleri görülmektedir. Her iki görüntüde de kırılma şekilleri birbirine benzemektedir. Ancak katkısız numune için fiber yüzeyi daha pürüzsüz ve temizken, KNT1 katkılı numunenin fiber yüzeyinde epoksi kalıntıları gözükmemektedir.

Tablo 4.13 KNT1 katkılı kompozit malzemelerin kayma mukavemeti.

Numune Adı	Deney No	Kalınlık (mm)	Genişlik (mm)	Kesit alanı (mm ²)	Maksimum yük (N)	Kayma mukavemeti (MPa)
KNT1 % 0.1	1	4.07	13.12	53.40	2919.87	54.68
	2	4.00	13.05	52.20	2801.62	53.67
	3	4.02	13.06	52.50	2652.76	50.53
	4	4.08	13.18	53.77	2917.81	54.26
	5	4.02	13.07	52.54	2783.18	52.97
Ortalama						53.22
Standart sapma						1.64
KNT1 % 0.3	1	4.05	13.35	54.07	2932.07	54.23
	2	4.04	13.28	53.65	2844.57	53.02
	3	3.99	13.21	52.71	2927.14	55.53
	4	3.97	13.18	52.32	2763.75	52.82
	5	3.95	13.17	52.02	2868.89	55.15
Ortalama						54.15
Standart sapma						1.22
KNT1 % 0.5	1	4.22	13.16	55.54	3221.55	58.00
	2	4.19	13.14	55.06	3203.91	58.19
	3	4.20	13.09	54.98	2987.82	54.34
	4	4.18	13.16	55.01	3140.05	57.08
	5	4.16	13.14	54.66	2918.28	53.39
Ortalama						56.20
Standart sapma						2.20



Şekil 4.30 Ağırlıkça farklı oranlardaki KNT1 katkılı kompozit malzemelerin kuvvet-yer değiştirme grafikleri.



a)

b)

Şekil 4.31 a) Katkısız **b)** % 0.5 oranında KNT1 içeren kompozit malzemenin kırılma yüzeyine ait taramalı elektron mikroskobu görüntüleri.

4.3.3 KNT2 karbon nanotüp katkılı E-cam lifi/epoksi tabakalı kompozit malzemenin kayma davranışı

KNT2 karbon nanotüp katkılı numunelerin kayma deneyi sonuçları Tablo 4.14’de görülmektedir. Tablo 4.14 incelendiğinde katkısız numuneye göre tüm oranlar için kayma mukavemeti azalmıştır. Kayma mukavemetinde en büyük azalma % 0.5 oranını içeren kompozit malzemede grlmştir. Katkısız numune ile kıyaslandığıında % 0.1, 0.3 ve 0.5 oranlarında kayma mukavemetinde sırasıyla % 3.30, 0.07 ve 13.28 düşüş meydana

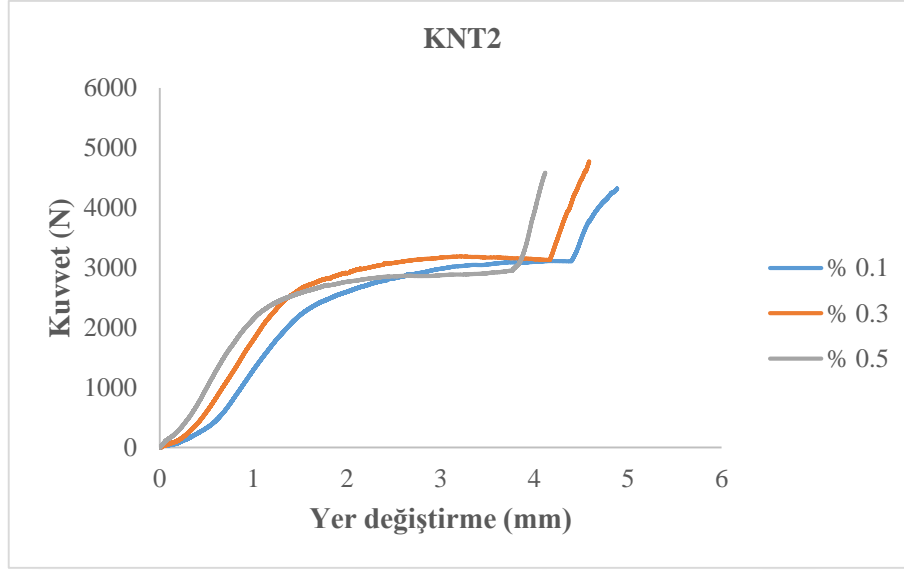
gelmiştir. % 0.3 oranına sahip kompozit malzeme katkısızla neredeyse aynı değerde olup, kayma mukavemeti değişmemiştir.

Şekil 4.32’de ise KNT2 karbon nanotüp katkılı kompozit malzemenin her bir oranı için kuvvet-yer değiştirme grafikleri görülmektedir. % 0.3 oranındaki kompozit malzeme diğer oranlara göre daha fazla yük taşımıştır. % 0.5 oranını içeren numune hem minimum yükü taşımış hem de minimum yer değiştirmiştir. % 0.1 oranındaki numunede ise maksimum yer değiştirme meydana gelmiştir. Tüm oranlarda doğru eğimi açısından farklılık gözükmemektedir.

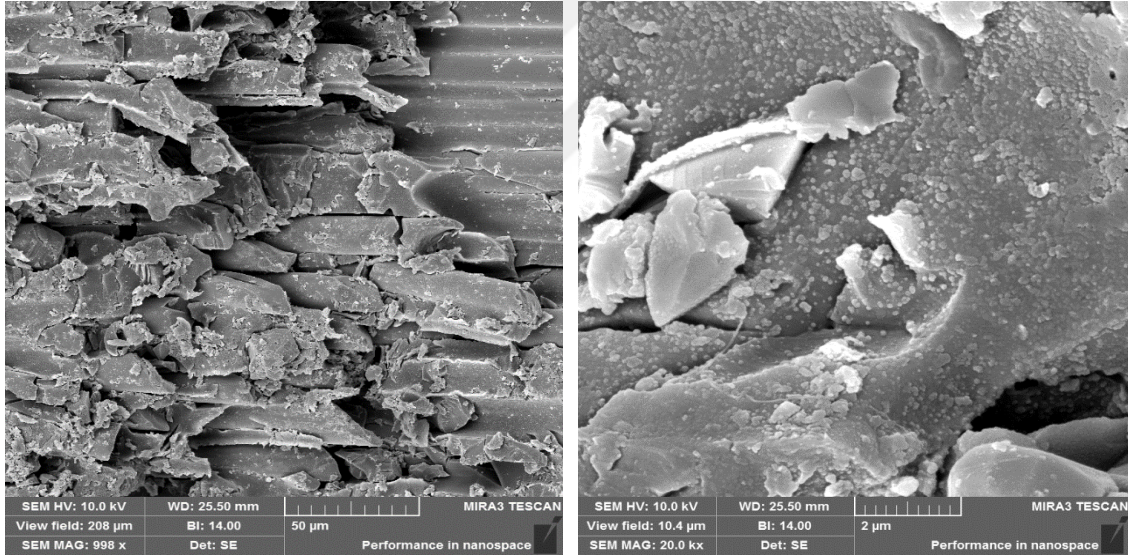
Şekil 4.33’de % 0.3 oranını içeren KNT2 katkılı kompozit malzemenin kayma testi sonucunda kırılma şekli ve matris içindeki nanotüp dağılımına ait taramalı elektron mikroskobu görüntüleri görülmektedir. Şekilde fiber yatakları ve fiberlerin üzerindeki matris artıkları göze çarpmaktadır. Fiberlerin kopma yüzeyi düzgün değildir ve kayma kırılmasının olduğu görülmektedir. Ayrıca oldukça homojen nanopartikül dağılımı mevcuttur.

Tablo 4.14 KNT2 katkılı kompozit malzemelerin kayma mukavemeti.

Numune Adı	Deney No	Kalınlık (mm)	Genişlik (mm)	Kesit alanı (mm ²)	Maksimum yük (N)	Kayma mukavemeti (MPa)
KNT2 % 0.1	1	4.15	13.11	54.41	2896.03	53.23
	2	4.17	13.11	54.67	3007.81	55.02
	3	4.21	13.15	55.36	2938.71	53.08
	4	4.18	13.14	54.93	2998.83	54.59
	5	4.18	13.12	54.84	3110.21	56.71
Ortalama						54.53
Standart sapma						1.48
KNT2 % 0.3	1	4.21	13.23	55.70	3145.62	56.47
	2	4.19	13.11	54.93	3035.43	55.26
	3	4.11	13.17	54.13	3186.74	58.87
	4	4.19	13.19	55.27	3078.34	55.70
	5	4.15	13.21	54.82	3038.57	55.43
Ortalama						56.35
Standart sapma						1.49
KNT2 % 0.5	1	4.41	13.22	58.30	2935.05	50.34
	2	4.39	13.21	57.99	2591.05	44.68
	3	4.33	13.17	57.03	2653.20	46.52
	4	4.37	13.14	57.42	2968.39	51.70
	5	4.34	13.18	57.20	2932.75	51.27
Ortalama						48.90
Standart sapma						3.12



Şekil 4.32 Ağırlıkça farklı oranlardaki KNT2 katkıli kompozit malzemelerin kuvvet-yer değiştirme grafikleri.



a)

b)

Şekil 4.33 KNT2 katkıli kompozit malzemenin (% 0.3 oranı) a) Kırılma yüzeyi b) Nanotüp dağılımını gösteren taramalı elektron mikroskobu görüntüleri.

4.3.4 KNT3 karbon nanotüp katkıli E-cam lifi/epoksi tabakalı kompozit malzemenin kayma davranışı

KNT3 karbon nanotüp katkıli numunelerin kayma deneyi sonuçları Tablo 4.15'de görülmektedir. Tablo 4.15'e göre katkısız numune baz alındığında her bir oranda kayma mukavemeti azalmıştır. Maksimum azalma % 0.1 oranında olmuştur. Katkısız numune

ile kıyaslandığında % 0.1, 0.3 ve 0.5 oranlarında kayma mukavemetinde sırasıyla % 7.08, 3.87 ve 4.47 düşüş meydana gelmiştir.

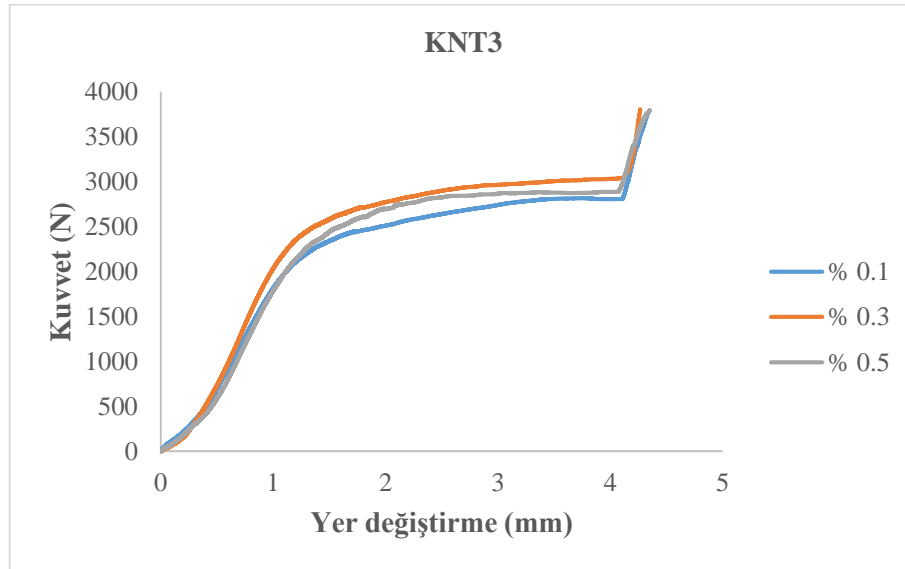
Literatürde yapılan çalışmalarda ise Aldousari (2016) açılı katlı ve tek yönlü cam fiber/epoksi tabakalı kompozit malzemeye çok duvarlı karbon nanotüp ekleyerek Iosipescu test metoduyla düzlem içi kayma dayanımının sırasıyla % 39.5 ve 1.4 arttığını bulmuştur. Fernandez vd., (2013) fonksiyonlaştırılmış çok duvarlı karbon nanotüpün cam fiber/epoksi kompozit malzemenin *rail shear* test yöntemiyle bulunan düzlem içi kayma mukavemetine önemsiz bir etkisi olduğunu bulmuşlardır. Kontrol numunelerine göre kayma mukavemetinin % 2.74 azaldığını tespit etmişlerdir. Rao vd., (2015) fonksiyonlaştırılmış çok duvarlı karbon nanotüp içeren karbon fiber takviyeli polimer kompozitler için $\pm 45^\circ$ 'lik numunelere çekme testi uygulayarak düzlem içi kayma dayanımının % 4 arttığını bulmuşlardır. Vargas vd., (2015) karbon fiber/epoksi kompozit malzemeye fonksiyonlaştırılmış çok duvarlı karbon nanotüp ekleyerek düzlem içi kayma mukavemetini % 15 artırmışlardır ve düzlem içi kayma özelliklerinin belirlenmesi için Mujika ve arkadaşları tarafından önerilen eksen dışı üç nokta eğilme test metodunu kullanmışlardır.

Şekil 4.34'de ise KNT3 karbon nanotüp katkılı kompozit malzemenin her bir oranı için kuvvet-yer değiştirme grafikleri karşılaştırmalı olarak görülmektedir. Seçilen test örneklerine göre maksimum yükü % 0.3 ve minimum yükü % 0.1 oranına sahip kompozit malzeme taşımıştır. Tüm oranlar için numunelerde yaklaşık olarak aynı miktarda yer değiştirme meydana gelmiştir. Doğruların eğimleri incelendiğinde ise her bir oranda başlangıçta eğimler hemen hemen aynı kalmıştır.

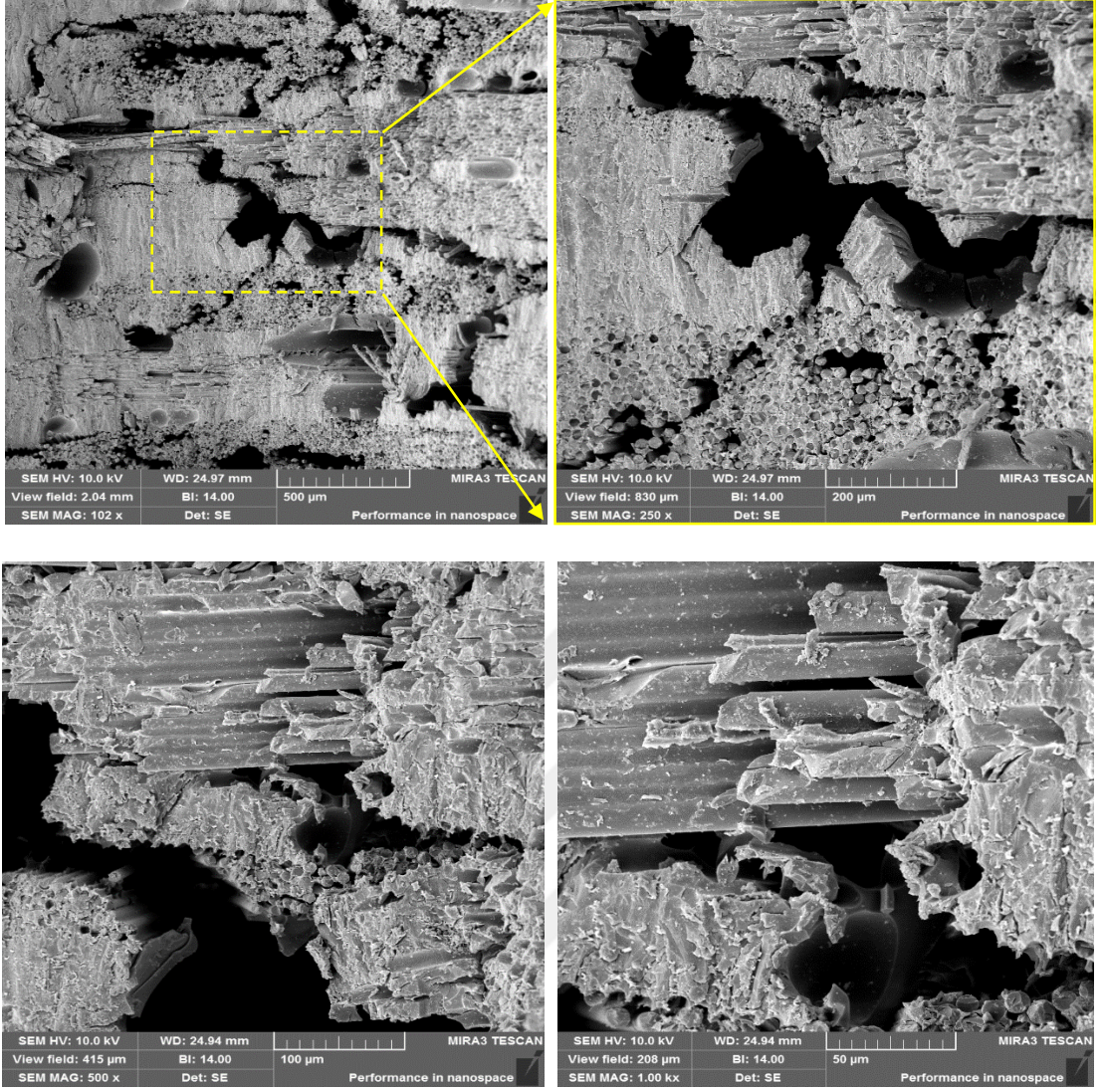
Şekil 4.35'de KNT3 katkılı numunenin kayma testi sonucunda kırılma yüzeyini içeren taramalı elektron mikroskobu görüntüleri görülmektedir. Numunenin kırılma yüzeyinde hava boşlukları ve çatlaklar göze çarpmaktadır. Üretim sırasında oluşan hava kabarcıklarının neden olduğu boşluklar mukavemetin azalmasına neden olmuştur. Ayrıca fiber üzerinde matris artıkları ve fiber yatakları görülmektedir. Fiberlerin kopma yüzeyi de düzgün değildir ve kayma kırılması gerçekleşmiştir.

Tablo 4.15 KNT3 katkıli kompozit malzemelerin kayma mukavemeti.

Numune Adı	Deney No	Kalınlık (mm)	Genişlik (mm)	Kesit alanı (mm ²)	Maksimum yük (N)	Kayma mukavemeti (MPa)
KNT3 % 0.1	1	4.09	13.20	53.99	2827.53	52.37
	2	4.15	13.13	54.49	2805.83	51.49
	3	4.10	13.16	53.96	2913.32	53.99
	4	4.16	13.24	55.08	2979.56	54.10
	5	4.13	13.24	54.68	2737.68	50.07
Ortalama						52.40
Standart sapma						1.71
KNT3 % 0.3	1	4.12	13.18	54.30	2830.15	52.12
	2	4.12	13.18	54.30	3074.25	56.62
	3	4.12	13.32	54.88	3034.04	55.28
	4	4.11	13.15	54.05	2937.95	54.36
	5	4.09	13.10	53.58	2820.81	52.65
Ortalama						54.21
Standart sapma						1.86
KNT3 % 0.5	1	4.27	13.19	56.32	2942.21	52.24
	2	4.18	13.20	55.18	2929.97	53.10
	3	4.14	13.15	54.44	2885.10	53.00
	4	4.20	13.11	55.06	3214.72	58.39
	5	4.27	13.20	56.36	2966.25	52.63
Ortalama						53.87
Standart sapma						2.55



Şekil 4.34 Ağırlıkça farklı oranlardaki KNT3 katkıli kompozit malzemelerin kuvvet-yer değiştirme grafiğleri.



Şekil 4.35 % 0.3 oranında KNT3 içeren kompozit malzemenin kırılma yüzeyine ait taramalı elektron mikroskobu görüntüleri.

4.3.5 Nanokil katkılı E-cam lifi/epoksi tabakalı kompozit malzemenin kayma davranışı

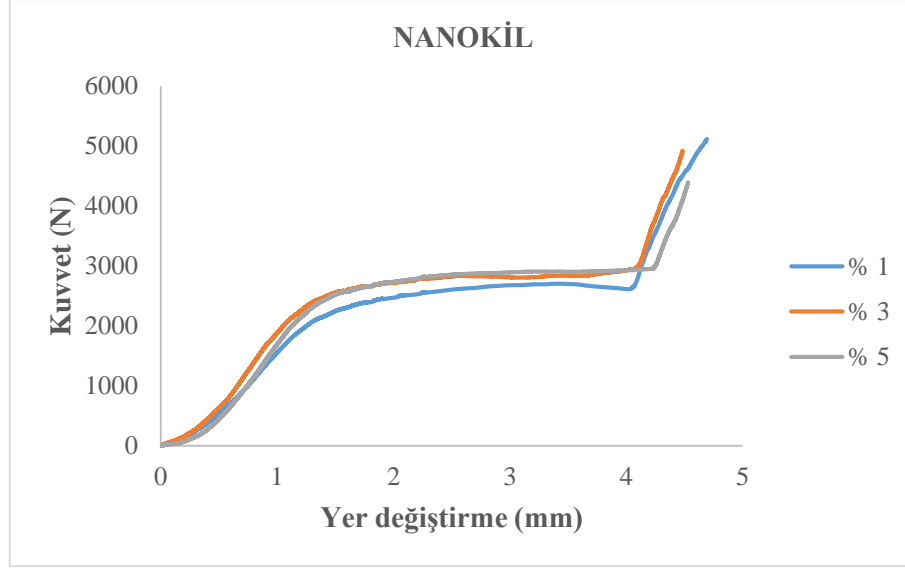
Nanokil katkılı numunelerin kayma deneyi sonuçları Tablo 4.16’da görülmektedir. Tablo 4.16 incelendiğinde her bir oran için kayma mukavemeti azalmıştır. Katkisız numune ile karşılaştırıldığında % 1, 3 ve 5 oranlarında kayma mukavemetinde sırasıyla % 13.53, 13.62 ve 11.40 düşüş meydana gelmiştir. % 1 ve 3 oranlarına sahip numunelerde neredeyse aynı miktarda azalma olmuştur. Minimum azalma % 5 oranını içeren kompozit malzemede görülmüştür. Şekil 4.36’da ise nanokil katkılı kompozit malzemenin her bir oranı için kuvvet-yer değiştirme grafikleri görülmektedir. Her bir oranı gösteren eğrilerin karakteristikleri birbirine benzemektedir.

Literatürde ise Tsai vd., (2008) E-cam lifi/epoksi kompozit malzemeye nanokil eklemişlerdir ve 10° ve $\pm 45^\circ$ 'lik numunelere çekme testi uygulayarak düzlem içi kayma dayanımını sırasıyla % 40.5 ve 32.3 artırmışlardır. Ayrıca Tsai vd., (2010) E-cam lifi/silika/epoksi hibrit kompozitlerden elde edilen 10° 'lik numunelere çekme testi yaparak düzlem içi kayma mukavemetinin % 27 arttığını bulmuşlardır.

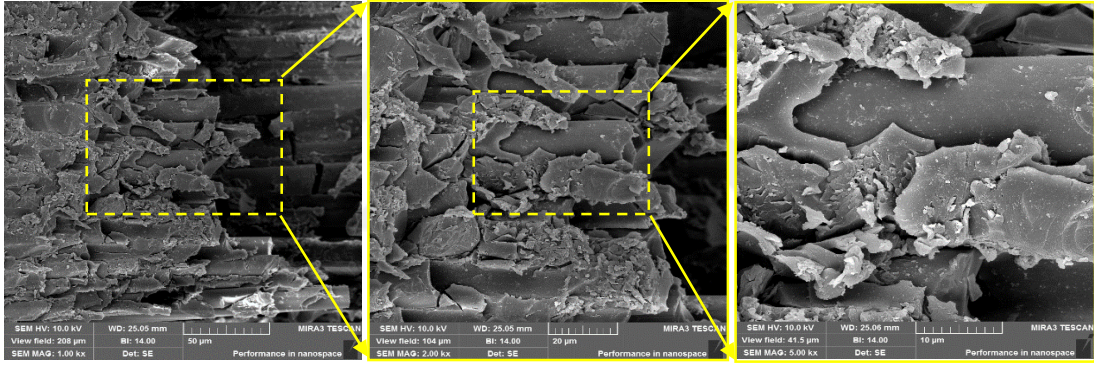
Şekil 4.37'de nanokil katkılı kompozit malzemenin taramalı elektron mikroskobu görüntüleri görülmektedir. Şekilden görüldüğü üzere fiberlerin kırılma yüzeyi düzgün değildir. Zayıf fiber-matris arayüz yapışması nedeniyle epoksinin fiberlerden büyük parçalar halinde koptuğu söylenebilir.

Tablo 4.16 Nanokil katkılı kompozit malzemelerin kayma mukavemeti.

Numune Adı	Deney No	Kalınlık (mm)	Genişlik (mm)	Kesit alanı (mm ²)	Maksimum yük (N)	Kayma mukavemeti (MPa)
Nanokil % 1	1	4.16	13.19	54.87	2634.92	48.02
	2	4.29	13.22	56.71	2702.87	47.66
	3	4.13	13.17	54.39	2624.43	48.25
	4	4.20	13.13	55.15	2727.35	49.45
	5	4.14	13.17	54.52	2749.92	50.44
Ortalama						48.76
Standart sapma						1.15
Nanokil % 3	1	4.66	13.17	61.37	2898.14	47.22
	2	4.65	13.11	60.96	3006.86	49.33
	3	4.54	13.22	60.02	2940.73	49.00
	4	4.61	13.19	60.81	2988.18	49.14
	5	4.57	13.20	60.32	2947.53	48.86
Ortalama						48.71
Standart sapma						0.85
Nanokil % 5	1	4.58	13.32	61.01	3100.95	50.83
	2	4.75	13.22	62.80	3169.26	50.47
	3	4.65	13.20	61.38	3009.52	49.03
	4	4.69	13.18	61.81	2947.37	47.68
	5	4.58	13.27	60.78	3147.84	51.79
Ortalama						49.96
Standart sapma						1.61



Şekil 4.36 Ağırlıkça farklı oranlardaki nanokil katkılı kompozit malzemelerin kuvvet-yer değiştirme grafikleri.

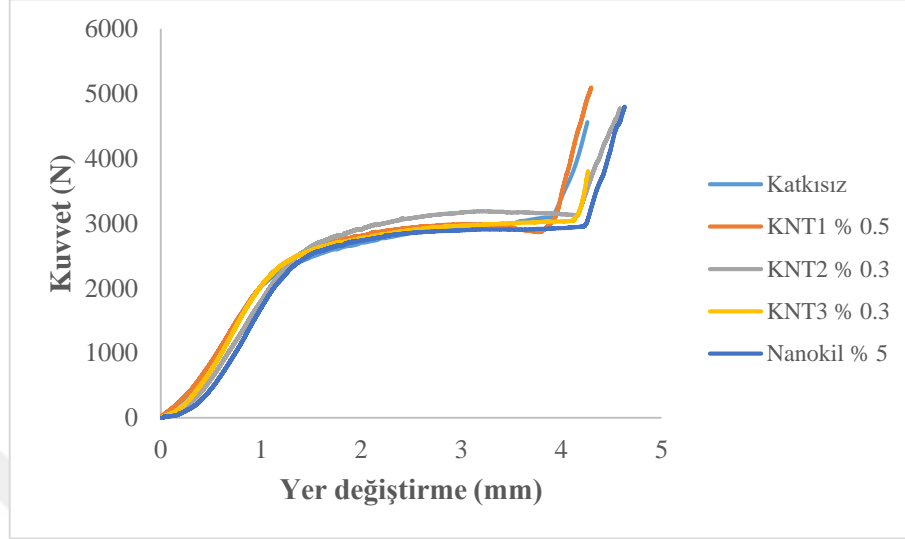


Şekil 4.37 % 5 oranında nanokil içeren kompozit malzemenin kırılma yezeyine ait taramalı elektron mikroskobu görüntüleri.

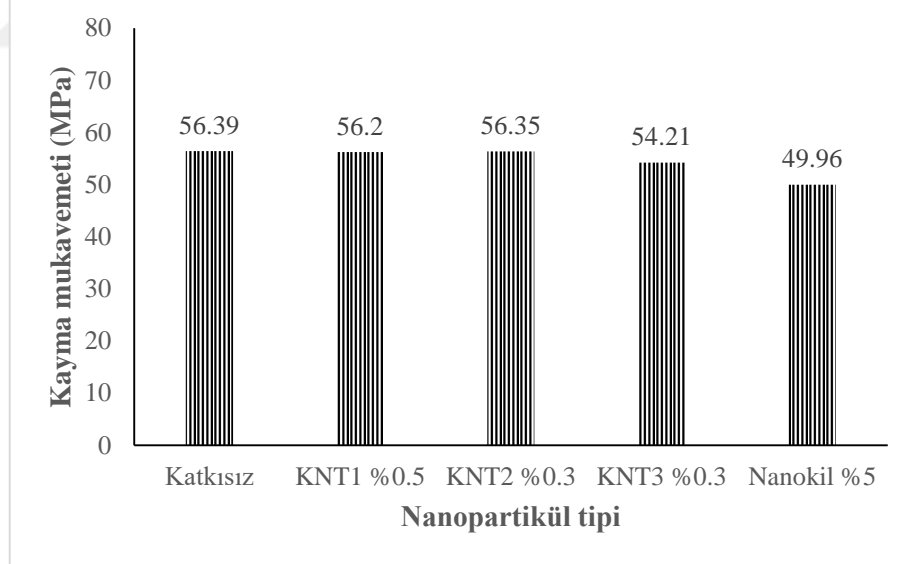
4.3.6 Nanopartikül katkılı kompozit malzemelerin kayma mukavemetlerinin karşılaştırılması

Şekil 4.38’de katkısız ve nanopartikül katkılı kompozit malzemelerin en iyi özellikleri gösteren oranlarına ait kuvvet-yer değiştirme grafikleri görülmektedir. Şekil 4.38’de seçilen test örneklerine göre tüm nanopartikülleri içeren numuneler neredeyse aynı miktarda yk taşımıştır. Şekil 4.39’da ise katkısız ve tüm nanopartikülleri içeren kompozit malzemeler sütün grafik olarak verilmiştir. Her bir nanopartikül için en iyi özellikleri gösteren oranlar seçilmiştir. Şekil 4.39’a göre tüm nanopartikül tipleri için kayma mukavemeti azalmıştır. Ancak KNT1 ve KNT2 adlı karbon nanotüpleri içeren numunelerdeki azalma kayda değer olmadığından, bu iki tip için kayma mukavemetinin

değişmediği söylenebilir. Kayma mukavemetinde minimum azalma ise nanokil içerikli numunede görülmüştür. Bu sonuçların ışığında matrise nanopartikül takviyesinin kayma mukavemetine ya hiçbir etkisinin olmadığı ya da azalmaya neden olduğu görülmüştür.



Şekil 4.38 Katkısız ve nanopartikül katkılı kompozit malzemelerin kuvvet-yer değiştirme grafikleri.



Şekil 4.39 Katkısız ve nanopartikül katkılı kompozit malzemelerin kayma mukavemetlerinin karşılaştırılması.

4.4 Üç Nokta Eğme Esneklik Testleri

Bu çalışmada tek yönlü lif takviyeli $[0^\circ/90^\circ]_{3S}$ oryantasyona sahip kompozit malzemeler kullanılmıştır. ASTM D790 standardı esas alınarak üç nokta eğme esneklik testleri gerçekleştirilmiştir. Katkısız ve nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin esneklik deneyleri beş kez tekrar edilmiştir. Bu beş değerın ortalaması alınarak standart sapmaları belirlenmiştir. Üç nokta eğme esneklik testleri sonucunda esneklik mukavemetleri bulunmuştur.

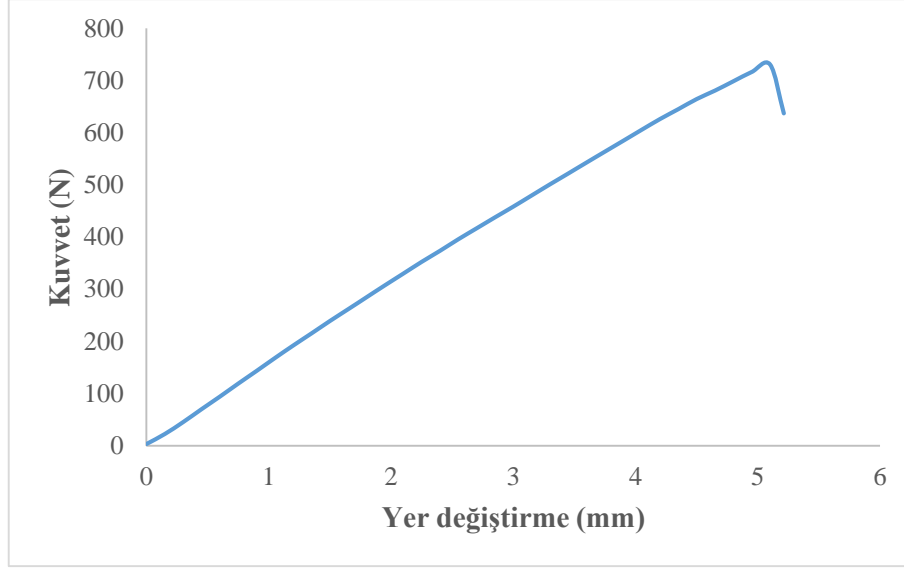
4.4.1 Katkısız E-cam lifi/epoksi tabakalı kompozit malzemenin esneklik davranışı

Katkısız numunelerin esneklik deneyi sonuçları Tablo 4.17’de görülmektedir. Şekil 4.40’da ise katkısız numuneye ait kuvvet-yer değiştirme grafiği verilmektedir. Bilindiği gibi numunede uygulanan yükün etkisiyle eğilmeden dolayı çekme ve basma bölgesi oluşmaktadır. Numunelerde yükleme silindirinin altındaki bölgede basma hasarı, mesnet silindirlerine denk gelen yüzde ise çekme hasarı olduğu gözlemlenmiştir. Grafikten görüldüğü üzere kompozit malzeme lineer davranış sergilemiş ve yük arttıkça yer değiştirme de artmıştır. Kompozit malzemede hasar oluşmaya başladıktan sonra yük de azalmıştır.

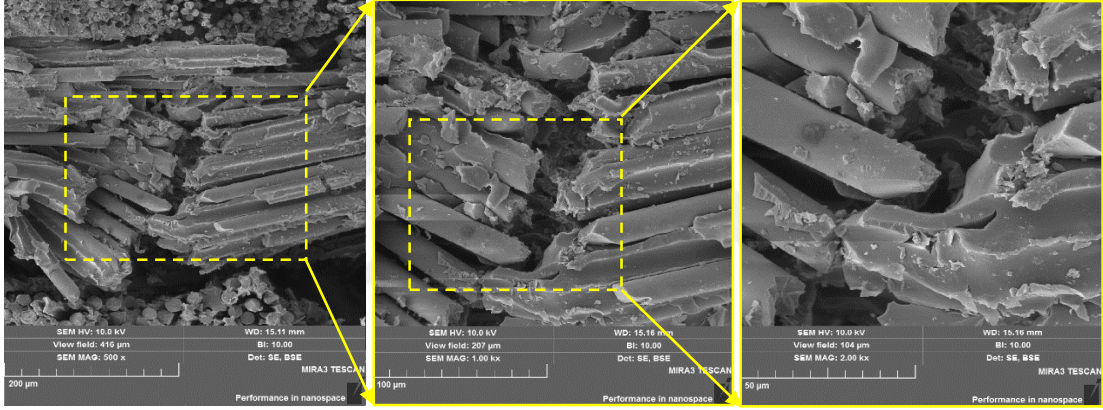
Şekil 4.41’de katkısız kompozit malzemenin kırılma yüzeyine ait taramalı elektron mikroskopu görüntülerinden matris ile fiberin kolaylıkla birbirinden ayrıldığı görülmüştür. Bu şekilde temiz bir ayrılma yüzeyinin oluşması fiber ile matris arasında iyi bir yapışmanın olmadığını göstergesidir.

Tablo 4.17 Katkısız kompozit malzemenin esneklik mukavemeti.

Deney No	Kalınlık (mm)	Genişlik (mm)	Mesnetler arası açıklık (mm)	Maksimum yük (N)	Esneklik mukavemeti (MPa)
1	4.20	12.68	68	648.20	295.59
2	4.17	12.77	68	557.44	256.06
3	4.10	12.67	68	543.09	260.09
4	4.16	12.68	68	730.77	339.68
5	4.07	12.65	68	627.76	305.57
Ortalama					291.40
Standart sapma					34.56



Şekil 4.40 Katkısız kompozit malzemenin kuvvet-yer değiştirme grafiği.



Şekil 4.41 Katkısız kompozit malzemenin kırılma yüzeylerine ait taramalı elektron mikroskobu görüntüleri.

4.4.2 KNT1 karbon nanotüp katkılı E-cam lifi/epoksi tabakalı kompozit malzemenin esneklik davranışı

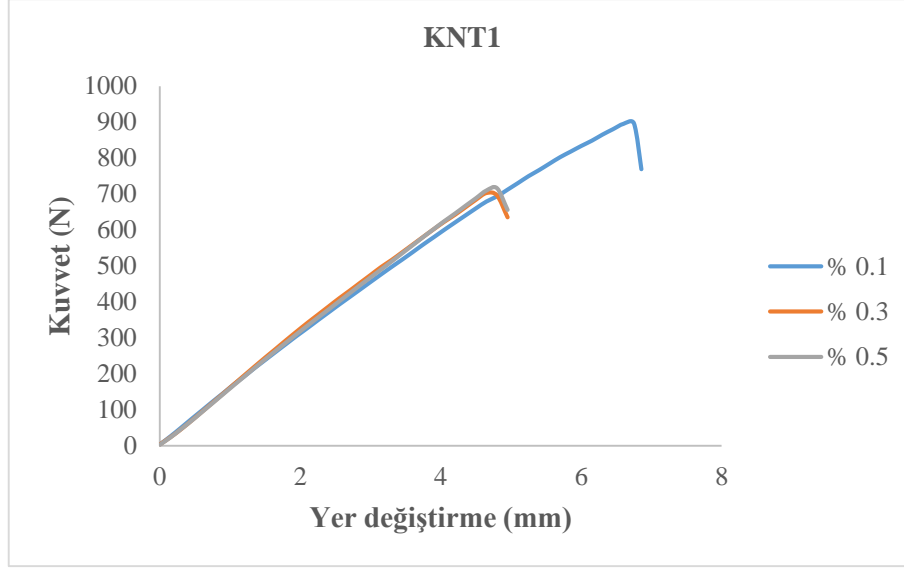
KNT1 karbon nanotüp katkılı numunelerin esneklik deneyi sonuçları Tablo 4.18'de görülmektedir. Tablo 4.18'e bakılacak olursa katkısız numuneye göre tüm oranlarda esneklik mukavemetleri artmıştır. Katkısız numune ile kıyaslandığında % 0.1, 0.3 ve 0.5 oranlarında esneklik mukavemetinde sırasıyla % 34.75, 13.87 ve 12.58 artış meydana gelmiştir. Maksimum artma % 0.1 oranında ve minimum artma ise % 0.5 oranına sahip kompozit malzemede olmuştur.

Şekil 4.42’de ise KNT1 karbon nanotüp katkılı kompozit malzemenin her bir oranı için kuvvet-yer değiştirme grafikleri karşılaştırmalı olarak görülmektedir. % 0.1 oranına ait kompozit malzeme diğerlerine göre hem yük hem de yer değiştirme açısından maksimum özellikler göstermiştir. % 0.3 ve 0.5 oranlarındaki kompozit malzemeler ise neredeyse aynı davranışı sergilemişlerdir. Ayrıca üç oran için doğruların eğimlerinin benzerlik gösterdiği bulunmuştur.

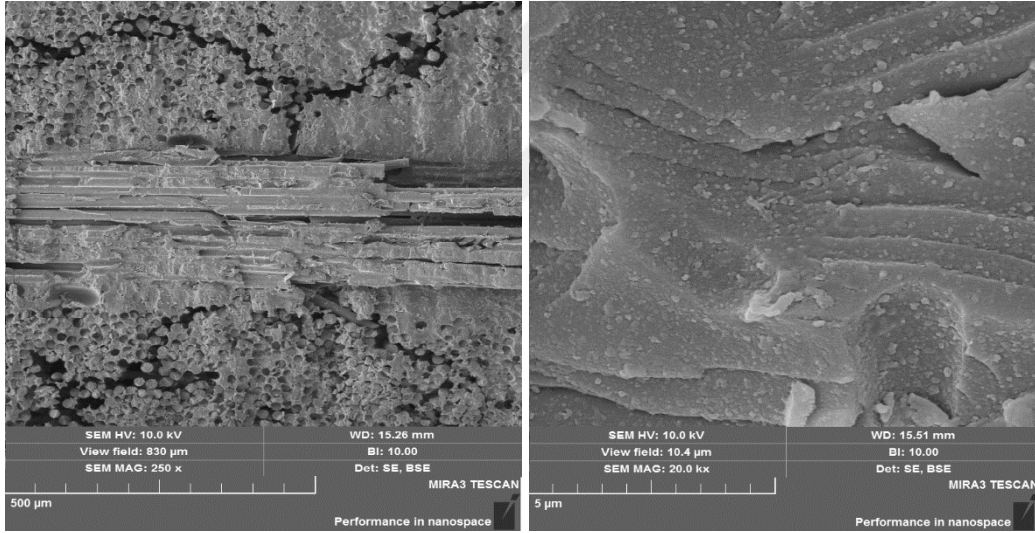
Şekil 4.43’de KNT1 katkılı kompozit malzemenin esneklik testi sonucunda kırılma yüzeyi ve nanopartikül dağılımına ait taramalı elektron mikroskobu görüntüleri görülmektedir. Numunelerin 0°’lik katlarında kirli lif yüzeyi dikkati çekmektedir. Lifler epoksiden tam olarak ayrılmamıştır ve kopan lifler de görülmektedir. 90°’lik katlarında ise çatlakların başladığı ve ilerlediği görülmektedir. Ayrıca 4.43b’de görüldüğü gibi karbon nanotüp epoksi içerisinde homojen olarak dağılmaktadır.

Tablo 4.18 KNT1 katkılı kompozit malzemelerin esneklik mukavemeti.

Numune Adı	Deney No	Kalınlık (mm)	Genişlik (mm)	Mesnetler arası açıklık (mm)	Maksimum yük (N)	Esneklik mukavemeti (MPa)
KNT1 % 0.1	1	4.01	12.60	68	896.50	451.33
	2	4.06	12.62	68	711.92	349.08
	3	4.06	12.62	68	735.66	360.72
	4	4.08	12.66	68	884.85	428.27
	5	4.04	12.61	68	754.58	373.96
Ortalama						392.67
Standart sapma						44.66
KNT1 % 0.3	1	4.17	12.63	68	741.59	344.42
	2	4.19	12.66	68	703.14	322.69
	3	4.23	12.65	68	718.75	323.90
	4	4.19	12.65	68	758.46	348.35
	5	4.20	12.67	68	700.57	319.72
Ortalama						331.82
Standart sapma						13.46
KNT1 % 0.5	1	4.16	12.66	68	793.12	369.25
	2	4.22	12.60	68	757.85	344.50
	3	4.29	12.62	68	716.19	314.52
	4	4.22	12.66	68	658.54	297.94
	5	4.20	12.69	68	689.32	314.09
Ortalama						328.06
Standart sapma						28.52



Şekil 4.42 Ağırlıkça farklı oranlardaki KNT1 katkıli kompozit malzemelerin kuvvet-yer değiştirme grafikleri.



Şekil 4.43 % 0.1 oranında KNT1 içeren kompozit malzemenin a) Kırılma yüzeyi b) Nanopartikül dağılımını gösteren taramalı elektron mikroskobu görüntüleri.

4.4.3 KNT2 karbon nanotüp katkıli E-cam lifi/epoksi tabakalı kompozit malzemenin esneklik davranışı

KNT2 karbon nanotüp katkıli numunelerin esneklik deneyi sonuçları Tablo 4.19'da görülmektedir. Tablo 4.19 incelendiğinde katkısız numuneye göre tüm oranlar için esneklik mukavemeti artmıştır. Katkısız numune ile kıyaslandığında % 0.1, 0.3 ve 0.5 oranlarında esneklik mukavemetinde sırasıyla % 9.03, 4.23 ve 3.17 artış meydana

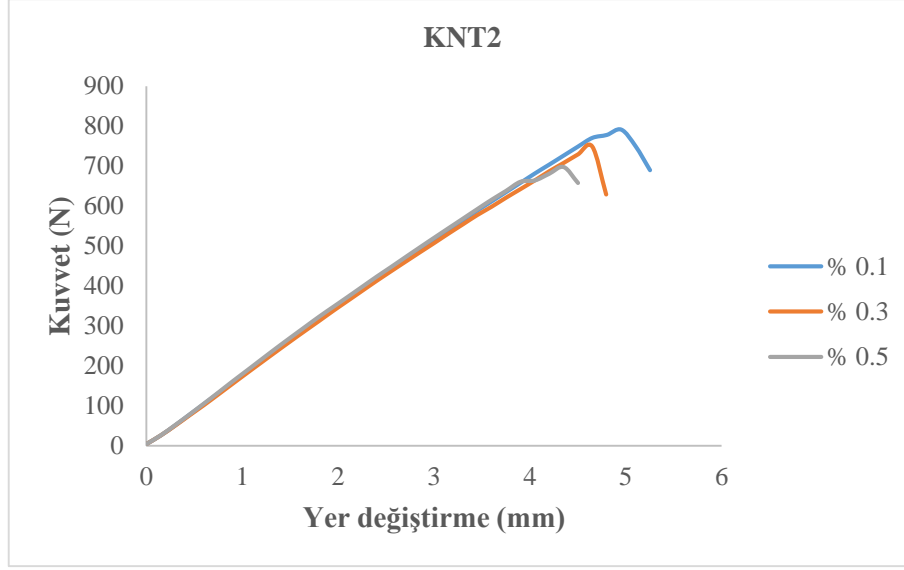
gelmiştir. KNT1 katkılı numunelerde olduğu gibi maksimum artma, % 0.1 oranını içeren kompozit malzemede görülmüştür.

Şekil 4.44’de ise KNT2 karbon nanotüp katkılı kompozit malzemenin her bir oranı için kuvvet-yer değiştirme grafikleri görülmektedir. Seçilen test örneklerine göre Şekil 4.44 incelendiğinde % 0.1 oranını içeren numune diğerlerine göre hem maksimum yükü taşımış hem de maksimum yer değiştirmiştir. Tüm oranlar için eğri karakteristikleri benzerlik göstermiştir.

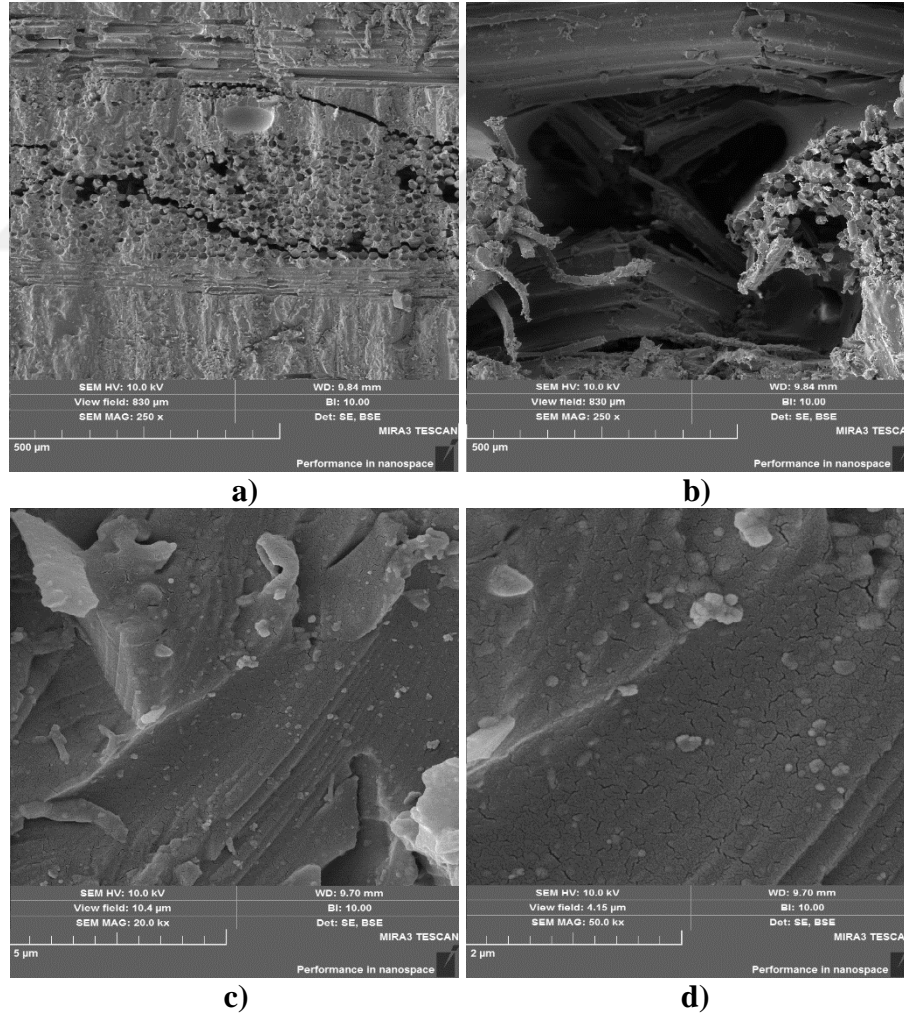
Şekil 4.45’de % 0.1 oranını içeren KNT2 katkılı kompozit malzemenin esneklik testine göre taramalı elektron mikroskobu görüntüleri verilmektedir. Şekil 4.45a’da matris çatlakları ve kopan fiberlerin yatakları görülmektedir. Ayrıca hava boşlukları da mevcuttur. Şekil 4.45b’de ise fiberlerin kırılması görülmektedir. Şekil 4.45c ve d’ye bakıldığında nanopartiküllerin bazı yerlerde uniform dağılım gösterdiği bazı yerlerde ise toplanmaların olduğu tespit edilmiştir.

Tablo 4.19 KNT2 katkılı kompozit malzemelerin esneklik mukavemeti.

Numune Adı	Deney No	Kalınlık (mm)	Genişlik (mm)	Mesnetler arası açıklık (mm)	Maksimum yük (N)	Esneklik mukavemeti (MPa)
KNT2 % 0.1	1	4.24	12.60	68	765.34	344.63
	2	4.22	12.60	68	577.94	262.72
	3	4.20	12.60	68	697.87	320.26
	4	4.24	12.67	68	685.88	307.14
	5	4.25	12.63	68	791.42	353.86
Ortalama						317.72
Standart sapma						35.96
KNT2 % 0.3	1	4.41	12.60	68	725.52	302.00
	2	4.37	12.60	68	641.49	271.93
	3	4.35	12.63	68	776.78	331.53
	4	4.44	12.60	68	730.52	299.98
	5	4.39	12.66	68	749.18	313.20
Ortalama						303.73
Standart sapma						21.74
KNT2 % 0.5	1	4.29	12.67	68	689.28	301.51
	2	4.37	12.62	68	761.46	322.27
	3	4.42	12.61	68	752.80	311.69
	4	4.35	12.60	68	649.77	277.98
	5	4.41	12.63	68	697.82	289.78
Ortalama						300.65
Standart sapma						17.48



Şekil 4.44 Ağırlıkça farklı oranlardaki KNT2 katkılı kompozit malzemelerin kuvvet-yer değistirme grafikleri.



Şekil 4.45 KNT2 katkılı kompozit malzemenin (% 0.1 oranı) taramalı elektron mikroskobu görüntüleri.

4.4.4 KNT3 karbon nanotüp katkılı E-cam lifi/epoksi tabakalı kompozit malzemenin esneklik davranışı

KNT3 karbon nanotüp katkılı numunelerin esneklik deneyi sonuçları Tablo 4.20’de görülmektedir. Tablo 4.20’e göre katkısız numune baz alındığında her bir oranda esneklik mukavemeti artmıştır. % 0.3 oranına sahip kompozit malzemede en iyi artış olmuştur. Katkısız numune ile kıyaslandığında % 0.1, 0.3 ve 0.5 oranlarında esneklik mukavemetinde sırasıyla % 18.22, 20.59 ve 11.22 artış meydana gelmiştir.

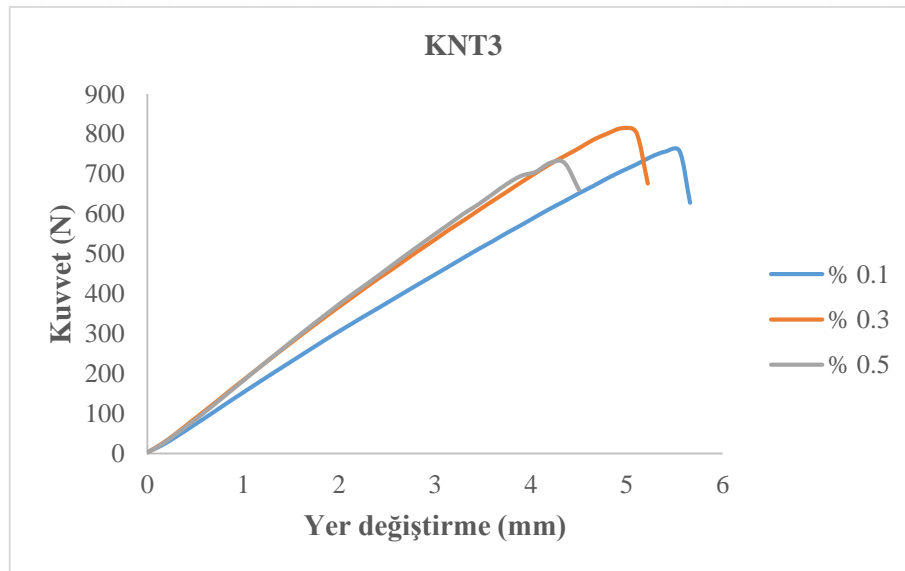
Literatürde yapılan çalışmalarda, Alnefaie vd., (2013) yarı izotropik ve tek yönlü cam fiber/epoksi tabakalı kompozit malzemeye çok duvarlı karbon nanotüp ekleyerek esneklik dayanımının sırasıyla % 20.7 ve 2.1 arttığını bulmuşlardır. Hossain vd., (2015) fonksiyonlaştırılmış karbon nanotüp takviyeli karbon fiber/epoksi kompozit malzemenin esneklik mukavemetinde % 27.45’lik iyileşme olduğunu tespit etmişlerdir. Muthu ve Dendere (2014) C-cam fiber/polyester kompozite fonksiyonlaştırılmış çok duvarlı karbon nanotüp ekleyerek eğilme dayanımını yaklaşık olarak % 13 artırmışlardır. Khosravi ve Eslami-Farsani (2015) fonksiyonlaştırılmış çok duvarlı karbon nanotüp takviyeli bazalt fiber/epoksi tabakalı kompozitin eğilme mukavemetini % 38 artırmışlardır. Shen vd., (2014) rami fiber/epoksi kompozite fonksiyonlaştırılmış çok duvarlı karbon nanotüp ekleyerek eğilme dayanımını % 34 artırmışlardır.

Şekil 4.46’da ise KNT3 karbon nanotüp katkılı kompozit malzemenin her bir oranı için kuvvet-yer değiştirme grafikleri karşılaştırmalı olarak görülmektedir. Seçilen test örneklerine göre maksimum yükü % 0.3 ve minimum yükü % 0.5 oranına sahip kompozit malzeme taşımıştır. Oran arttıkça her bir malzeme için yer değiştirme de azalmıştır.

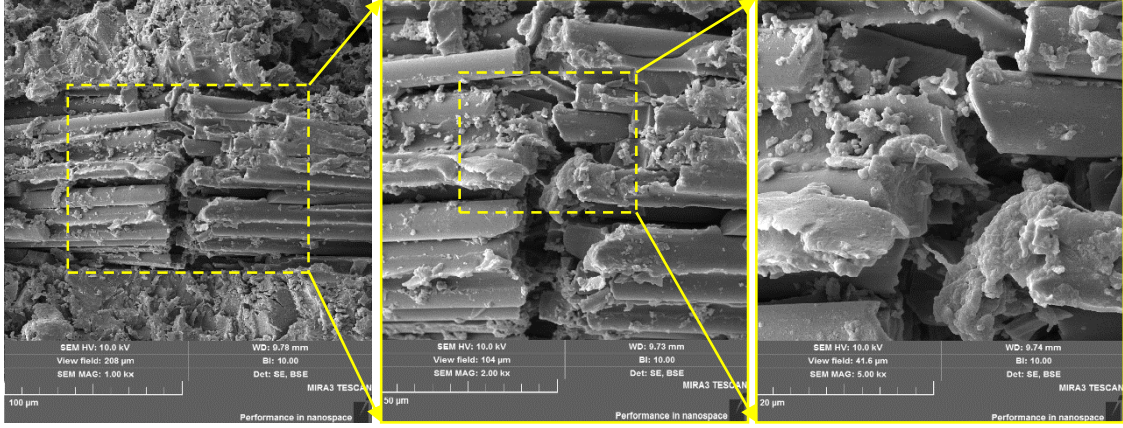
Şekil 4.47’de KNT3 katkılı numunenin esneklik testi sonucunda kırılma yüzeyini içeren taramalı elektron mikroskobu görüntüleri görülmektedir. Lif yüzeyinin matris kalıntıları ile kaplı olmasından ve kirli görüntüden fiber ile matris arayüz yapışmasının iyi olduğu anlaşılmaktadır.

Tablo 4.20 KNT3 katkılı kompozit malzemelerin esneklik mukavemeti.

Numune Adı	Deney No	Kalınlık (mm)	Genişlik (mm)	Mesnetler arası açıklık (mm)	Maksimum yük (N)	Esneklik mukavemeti (MPa)
KNT3 % 0.1	1	4.15	12.60	68	808.56	380.05
	2	4.16	12.60	68	685.61	320.72
	3	4.17	12.60	68	685.07	318.93
	4	4.20	12.63	68	777.05	355.75
	5	4.20	12.62	68	757.39	347.03
Ortalama						344.50
Standart sapma						25.57
KNT3 % 0.3	1	4.45	12.69	68	791.03	321.08
	2	4.40	12.64	68	815.06	339.73
	3	4.19	12.64	68	858.72	394.71
	4	4.33	12.69	68	737.56	316.20
	5	4.04	12.60	68	776.93	385.34
Ortalama						351.41
Standart sapma						36.48
KNT3 % 0.5	1	4.52	12.69	68	728.23	286.50
	2	4.49	12.62	68	927.53	371.86
	3	4.39	12.61	68	727.34	305.28
	4	4.53	12.60	68	774.72	305.62
	5	4.42	12.61	68	848.26	351.21
Ortalama						324.09
Standart sapma						35.80



Şekil 4.46 Ağırlıkça farklı oranlardaki KNT3 katkılı kompozit malzemelerin kuvvet-yer değiştirme grafikleri.



Şekil 4.47 % 0.3 oranında KNT3 içeren kompozit malzemenin kırılma yüzeyine ait taramalı elektron mikroskobu görüntüleri.

4.4.5 Nanokil katkı E-cam lifi/epoksi tabakalı kompozit malzemenin esneklik davranışı

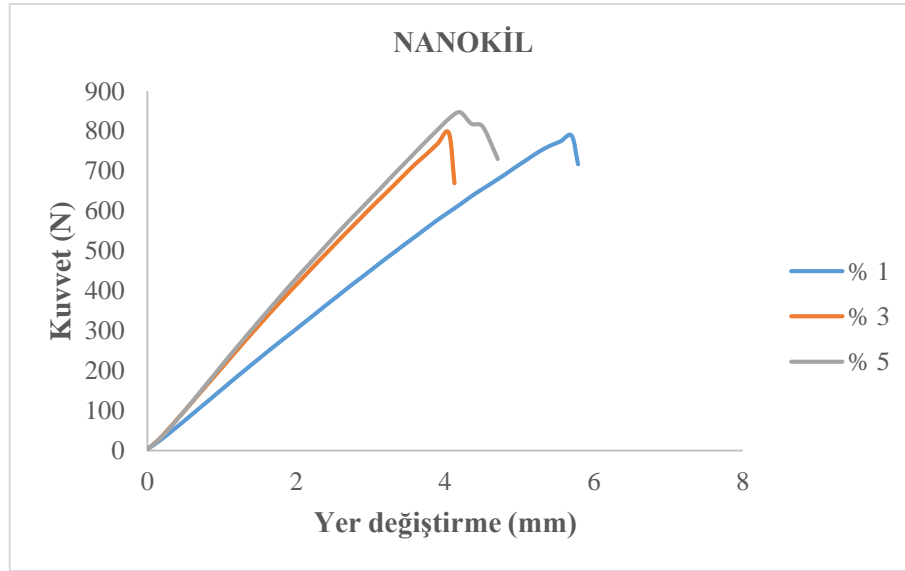
Nanokil katkıli numunelerin esneklik deneyi sonuçları Tablo 4.21’de görülmektedir. Tablo 4.21 incelendiğinde katkısız numuneye göre esneklik mukavemeti % 1 oranı için % 14.63 artmış, % 3 oranında % 4.52 azalmış ve % 5 oranında ise % 8.72 artmıştır. Nanokil için sadece % 3 oranını içeren kompozit malzemedeki azalma görülmüştür.

Literatürde Bozkurt vd., (2007) E-cam lifi/epoksi kompozit malzemeye nanokil ekleyerek eğilme dayanımının % 16 arttığını bulmuşlardır. Chandradass vd., (2008) nanokil takviyeli cam fiber/vinilester kompozitin eğilme mukavemetini artırmışlardır. Karippal vd., (2011) cam fiber/epoksi/nanokil hibrit kompozitlerin eğilme dayanımının % 10.5 arttığını belirtmişlerdir. Mahesh vd., (2012) cam fiber/vinilester kompozit malzemelere nanokil ekleyerek eğilme mukavemetini % 47 artırmışlardır. Zhou vd., (2012) nanokil takviyeli karbon fiber/epoksi kompozitin eğilme dayanımının % 13.5 arttığını bulmuşlardır.

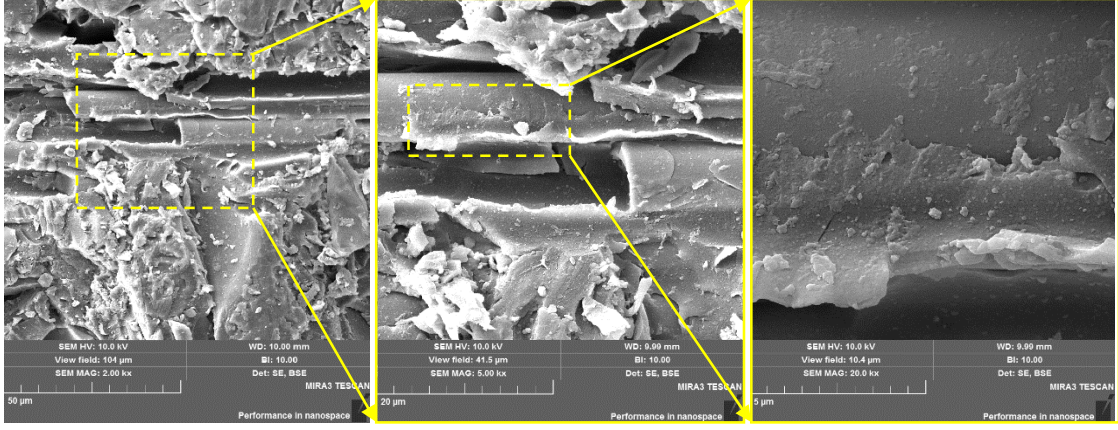
Şekil 4.48’de ise nanokil katkıli kompozit malzemenin her bir oranı için kuvvet-yer değiştirme grafikleri görülmektedir. Seçilen test örneklerine göre % 5 oranındaki kompozit malzeme üzerine en fazla yükü almıştır. Ama bu numune imalattan dolayı diğerlerinden daha kalındır. % 1 ve 3 oranındaki kompozit malzemeler ise yaklaşık olarak aynı miktarda yük taşımıştır. Ama yine imalattan dolayı kalınlıklar farklıdır ve gerilmeler açısından ters bir durum vardır. Ayrıca % 3 ve 5 oranlarında maksimum yüke kadar eğriler hemen hemen çakışıktır.

Tablo 4.21 Nanokil katkıli kompozit malzemelerin esneklik mukavemeti.

Numune Adı	Deney No	Kalınlık (mm)	Genişlik (mm)	Mesnetler arası açıklık (mm)	Maksimum yük (N)	Esneklik mukavemeti (MPa)
Nanokil % 1	1	4.19	12.60	68	696.23	321.04
	2	4.15	12.62	68	678.76	318.54
	3	4.15	12.61	68	718.72	337.56
	4	4.24	12.64	68	701.38	314.83
	5	4.10	12.65	68	788.42	378.18
Ortalama						334.03
Standart sapma						26.17
Nanokil % 3	1	4.50	12.64	68	747.41	297.84
	2	4.68	12.64	68	794.68	292.79
	3	4.62	12.63	68	647.18	244.87
	4	4.50	12.62	68	646.29	257.95
	5	4.45	12.60	68	728.05	297.63
Ortalama						278.22
Standart sapma						24.99
Nanokil % 5	1	4.75	12.61	68	847.48	303.83
	2	4.88	12.60	68	956.00	324.97
	3	4.89	12.60	68	925.38	313.28
	4	4.82	12.77	68	958.24	329.45
	5	4.85	12.63	68	910.31	312.54
Ortalama						316.81
Standart sapma						10.31



Şekil 4.48 Ağırlıkça farklı oranlardaki nanokil katkıli kompozit malzemelerin kuvvet-yer değiştirme grafikleri.



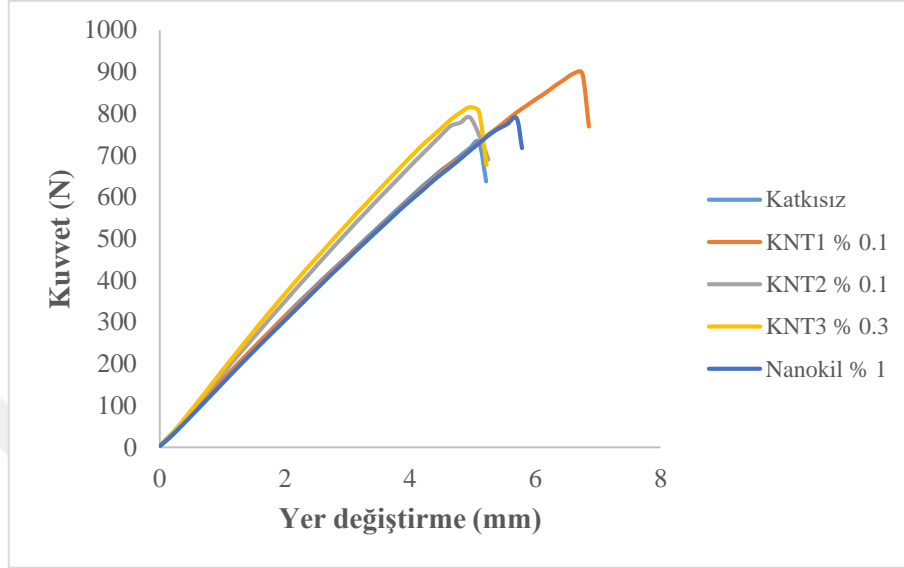
Şekil 4.49 Nanokil katkılı (% 1 oranı) kompozit malzemenin taramalı elektron mikroskobu görüntüleri.

Şekil 4.49'da % 1 oranında nanokil içeren kompozit malzemenin taramalı elektron mikroskobu görüntüleri verilmektedir. Şekil 4.49a ve b'de fiberlerin kırılması görülmektedir. Şekil 4.49c'de ise fiber yüzeyindeki partikül dağılımı ve topaklanmalar göze çarpmaktadır.

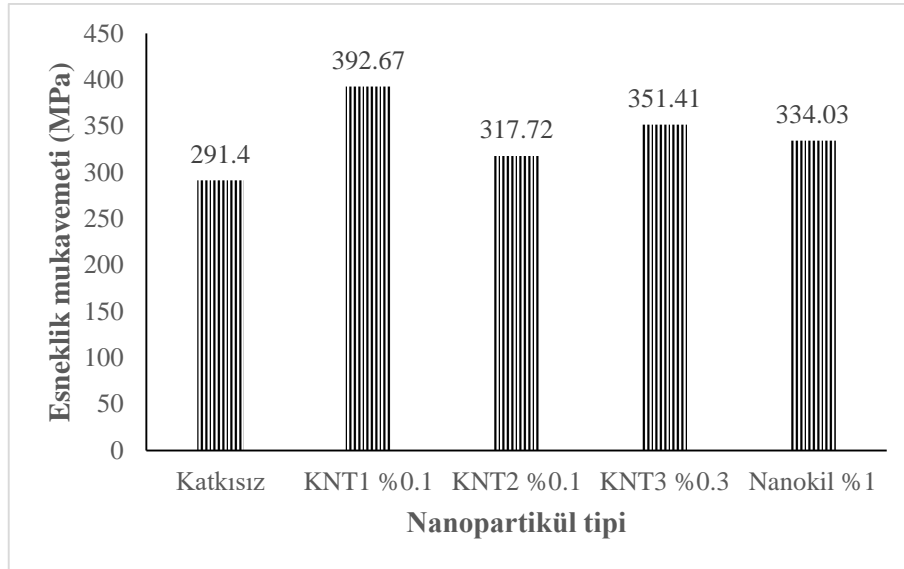
4.4.6 Nanopartikül katkılı kompozit malzemelerin esneklik mukavemetlerinin karşılaştırılması

Şekil 4.50'de katkısız ve nanopartikül katkılı kompozit malzemelerin en iyi özellikleri gösteren oranlarına ait kuvvet-yer değiştirme grafikleri görülmektedir. Şekil 4.50'ye göre KNT1 karbon nanotüplü numune en fazla yükü üzerine almıştır. Ayrıca maksimum yer değiştirme de KNT1 karbon nanotüplü numunede ortaya çıkmıştır. Şekil 4.51'de ise katkısız ve tüm nanopartikülleri içeren kompozit malzemeler sütun grafik olarak verilmiştir. Her bir nanopartikül için en iyi özellikleri gösteren oranlar seçilmiştir. Şekil 4.51'e göre hem karbon nanotüpler hem de nanokil için esneklik mukavemeti artmıştır. Karbon nanotüpler kendi arasında değerlendirildiğinde, esneklik mukavemetindeki maksimum artış KNT1 ve minimum artış KNT2 karbon nanotüplü numunede meydana gelmiştir. Bu sonuca göre, çapları aynı olan ve sadece uzunlukları birbirinden farklı olan iki nanotüp arasında kısa olan KNT1 karbon nanotüplü numunenin eğilme yüküne karşı daha dayanıklı olduğu bulunmuştur. Ayrıca iç çapı ve uzunluğu yaklaşık olarak aynı olan KNT2 ve KNT3 karbon nanotüplü numuneler arasında dış çapı büyük olan KNT3 katkılı numune daha iyi sonuç vermiştir. Grafikten de anlaşılacağı üzere en iyi artışlar genellikle en düşük oranlarda ortaya çıkmıştır. Çünkü oran artışına bağlı olarak epoksi-nanopartikül karışımının viskozitesinin artması hava kabarcıklarının içeride kalmasına neden

olmuştur. Karışımın içinde kalan hava kabarcıkları da boşlukların oluşmasını sağlayarak mukavemetin azalmasına sebep olmuştur. Elde edilen sonuçlardan, bir kompozit malzemenin esneklik mukavemetinden daha çok matris elemanın sorumlu olduğu görülmektedir.



Şekil 4.50 Katkısız ve nanopartikül katkılı kompozit malzemelerin kuvvet-yer değiştirme grafikleri.



Şekil 4.51 Katkısız ve nanopartikül katkılı kompozit malzemelerin esneklik mukavemetlerinin karşılaştırılması.

4.5 Tabakalar Arası Kayma Mukavemeti Testleri

Bu çalışmada tek yönlü lif takviyeli $[0^\circ/90^\circ]_{3S}$ oryantasyona sahip kompozit malzemeler kullanılmıştır. ASTM D2344 standardı esas alınarak tabakalar arası kayma mukavemeti testi yapılmıştır. Katkısız ve nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin tabakalar arası kayma mukavemeti deneyleri beş kez tekrar edilmiştir. Bu beş değer in ortalaması alınarak standart sapmaları belirlenmiştir. Testler sonucunda tabakalar arası kayma mukavemeti bulunmuştur.

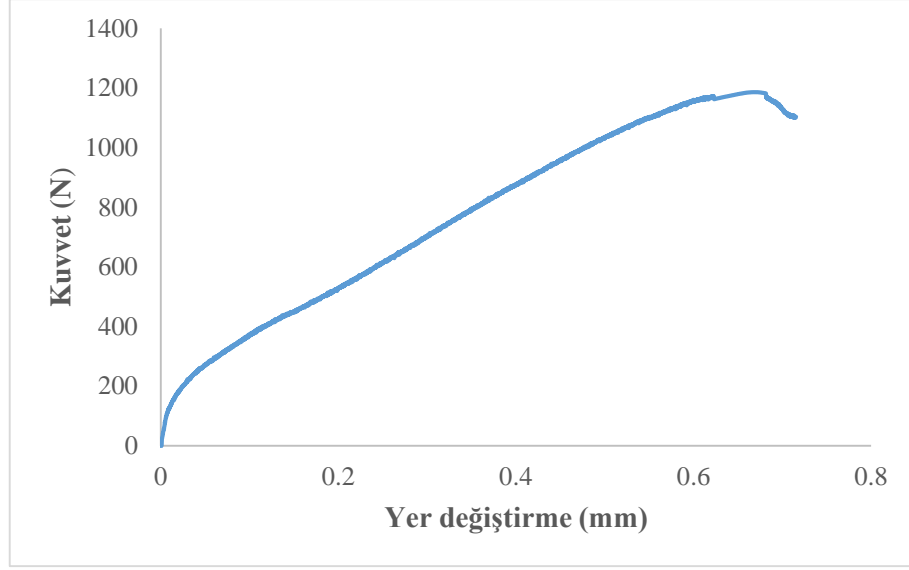
4.5.1 Katkısız E-cam lifi/epoksi tabakalı kompozit malzemenin tabakalar arası kayma davranışı

Katkısız numunelerin tabakalar arası kayma mukavemeti deneyi sonuçları Tablo 4.22’de görülmektedir. Şekil 4.52’de ise katkısız kompozit malzemeye ait kuvvet-yer değiştirme grafiği verilmektedir. Grafikten görüldüğü üzere kompozit malzeme başlangıçta yaklaşık olarak 100 N değerine kadar üzerine yük almasına rağmen yer değiştirme olmamıştır. Ancak daha sonra kompozit malzeme lineer davranmış ve kuvvet arttıkça yer değiştirme de artmıştır.

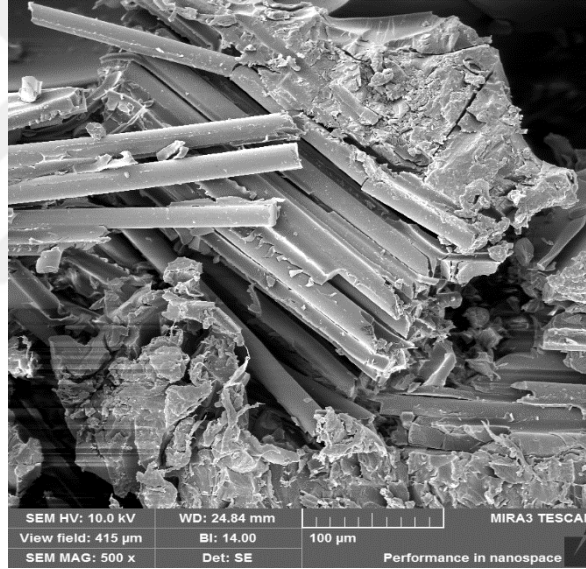
Şekil 4.53’te katkısız numuneye ait taramalı elektron mikroskobu görüntüsü görülmektedir. Burada oldukça temiz fiber yüzeyleri dikkati çekmektedir. Fiberler matristen kolaylıkla sıyrılmış ve kırılma gerçekleşmiştir.

Tablo 4.22 Katkısız kompozit malzemenin tabakalar arası kayma mukavemeti.

Deney No	Kalınlık (mm)	Genişlik (mm)	Maksimum yük (N)	Tabakalar arası kayma mukavemeti (MPa)
1	4.13	8.00	1156.85	26.26
2	4.12	8.00	1166.42	26.54
3	4.19	7.99	1186.49	26.58
4	4.14	7.98	1201.11	27.27
5	4.14	8.00	1200.64	27.19
Ortalama				26.77
Standart sapma				0.44



Şekil 4.52 Katkısız kompozit malzemenin kuvvet-yer değiştirme grafiği.



Şekil 4.53 Katkısız kompozit malzemenin kırılma yüzeyini içeren taramalı elektron mikroskobu görüntüsü.

4.5.2 KNT1 karbon nanotüp katkılı E-cam lifi/epoksi tabakalı kompozit malzemenin tabakalar arası kayma davranışı

KNT1 karbon nanotüp katkılı numunelerin tabakalar arası kayma mukavemeti deneyi sonuçları Tablo 4.23’de görölmektedir. Tablo 4.23’e göre tabakalar arası kayma mukavemeti katkısız numune ile kıyaslandığında % 0.1 ile 0.3 oranlarında (% 19.72 ve 3.32) artmış ve % 0.5 oranında ise (% 1.83) azalmıştır. Maksimum artış % 0.1 oranını

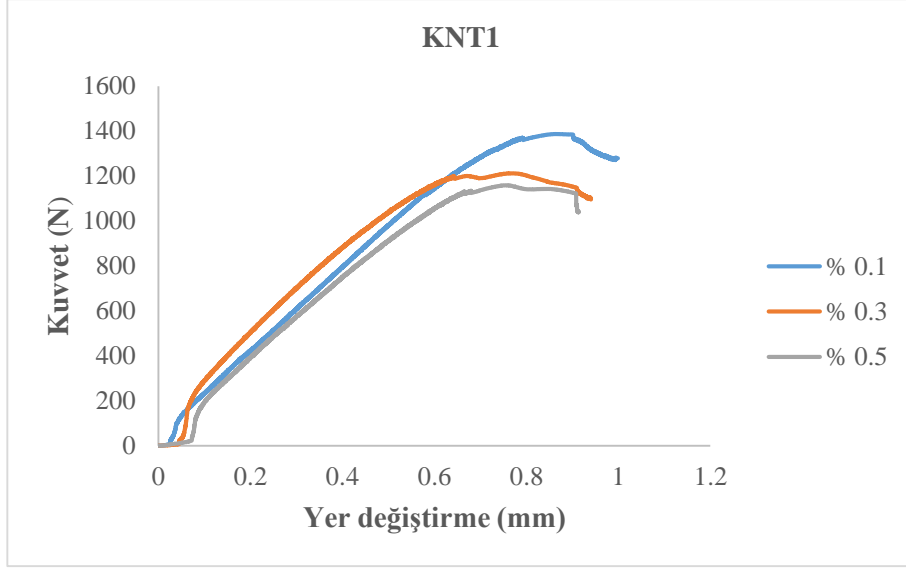
içeren numunede görülmüştür. Epoksi içerisine % 0.5 oranında karbon nanotüp eklenmesi viskozite artışına neden olarak mukavemeti azaltmıştır.

Şekil 4.54'te ise KNT1 karbon nanotüp katkılı kompozit malzemenin her bir oranı için kuvvet-yer değiştirme grafikleri karşılaştırmalı olarak görülmektedir. Seçilen test örneklerine göre % 0.1 oranına ait kompozit malzeme maksimum yükü taşıırken, % 0.5 oranına sahip kompozit malzeme ise minimum yükü taşımıştır. Yer değiştirmeler açısından oranlar arasında çok bir fark olmamıştır. Üç oran için eğriler birbiriyle benzerlik göstermiştir.

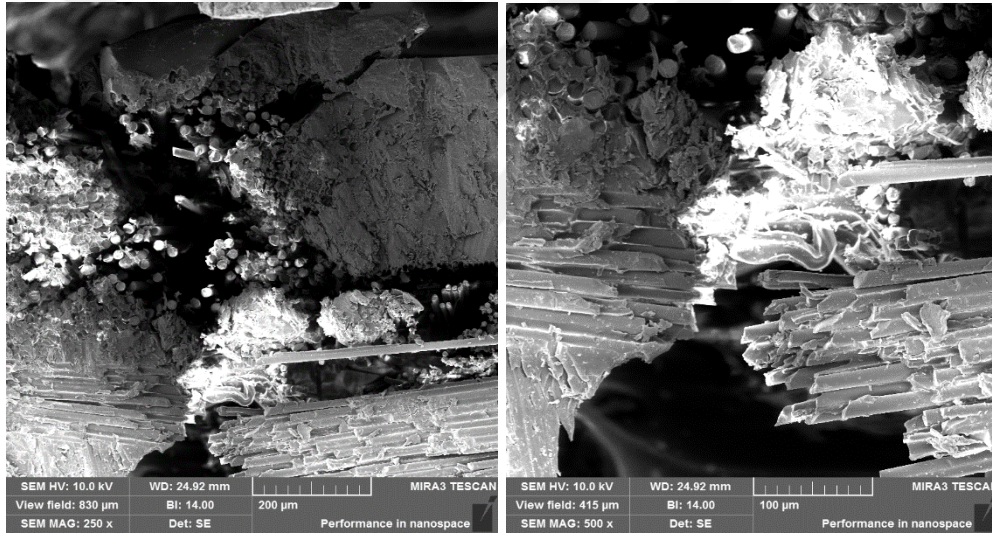
Şekil 4.55'te KNT1 katkılı kompozit malzemenin tabakalar arası kayma mukavemeti testi sonucunda kırılma yüzeyine ait taramalı elektron mikroskobu görüntüleri verilmektedir. Şekil 4.55a'da kayma kırılması, tabaka ayrışması ve matris çatlağı görülmektedir. Şekil 4.55b'de fiberlerin üzerinde epoksi artıkları bulunmaktadır. Ayrıca farklı oryantasyondaki (0° ve 90°) lifler kendi içinde de ayrılmalara maruz kalmıştır.

Tablo 4.23 KNT1 katkılı kompozit malzemelerin tabakalar arası kayma mukavemeti.

Numune Adı	Deney No	Kalınlık (mm)	Genişlik (mm)	Maksimum yük (N)	Tabakalar arası kayma mukavemeti (MPa)
KNT1 % 0.1	1	4.13	8.00	1448.39	32.88
	2	4.14	8.01	1400.63	31.68
	3	4.10	7.96	1394.43	32.05
	4	4.10	7.98	1387.12	31.80
	5	4.00	7.98	1356.01	31.86
Ortalama Standart sapma					32.05 0.48
KNT1 % 0.3	1	4.20	8.01	1243.43	27.72
	2	4.17	7.98	1216.37	27.41
	3	4.24	8.00	1289.09	28.50
	4	4.15	7.97	1222.81	27.73
	5	4.22	7.99	1212.12	26.96
Ortalama Standart sapma					27.66 0.56
KNT1 % 0.5	1	4.19	8.00	1215.42	27.19
	2	4.23	7.98	1174.85	26.10
	3	4.21	7.99	1212.64	27.04
	4	4.24	8.01	1159.83	25.61
	5	4.28	7.97	1158.64	25.47
Ortalama Standart sapma					26.28 0.80



Şekil 4.54 Ağırlıkça farklı oranlardaki KNT1 katkıli kompozit malzemelerin kuvvet-yer değiştirme grafikleri.



a)

b)

Şekil 4.55 % 0.1 oranında KNT1 içeren kompozit malzemenin kırılma yüzeyine ait taramalı elektron mikroskobu görüntüleri.

4.5.3 KNT2 karbon nanotüp katkıli E-cam lifi/epoksi tabakalı kompozit malzemenin tabakalar arası kayma davranışı

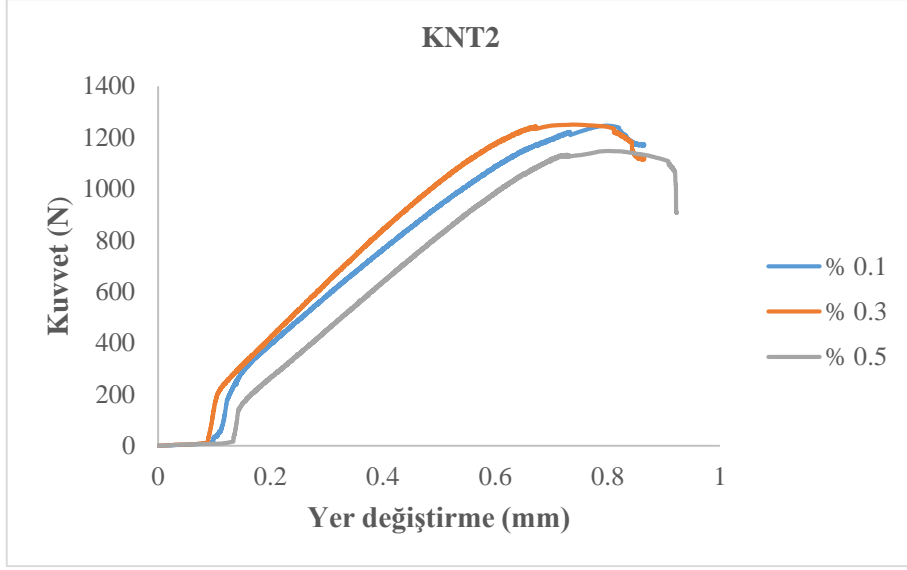
KNT2 karbon nanotüp katkıli numunelerin tabakalar arası kayma mukavemeti deneyi sonuçları Tablo 4.24'de görölmektedir. Katkısız numune ile kıyaslandığında tabakalar arası kayma mukavemeti % 0.1 oranında % 4.15 artarken, % 0.3 ve 0.5 oranlarında sırasıyla % 2.69 ve 7.55 azalmıştır. Tabakalar arası kayma mukavemetinde en büyük azalma % 0.5 oranını içeren kompozit malzemede görölmüştür. KNT1 katkıli

numunelerde olduğu gibi burada da oran artışı, karışımın viskozitesini artırarak mukavemetin azalmasına sebep olmuştur.

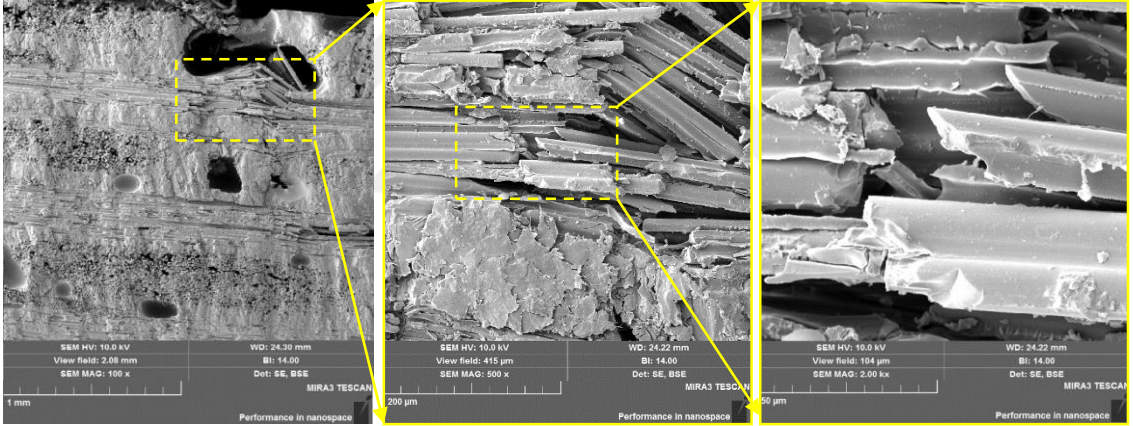
Şekil 4.56’da ise KNT2 karbon nanotüp katkılı kompozit malzemenin her bir oranı için kuvvet-yer değiştirme grafikleri görülmektedir. Seçilen test örneklerine göre % 0.5 oranındaki kompozit malzeme en az yükü taşımıştır. Ayrıca en fazla yer değiştirme bu oranda görülmüştür. % 0.1 ve 0.3 oranlarını içeren kompozit malzemeler ise taşıdıkları yük ve meydana gelen yer değiştirme açısından hemen hemen aynı davranışı göstermişlerdir.

Tablo 4.24 KNT2 katkılı kompozit malzemelerin tabakalar arası kayma mukavemeti.

Numune Adı	Deney No	Kalınlık (mm)	Genişlik (mm)	Maksimum yük (N)	Tabakalar arası kayma mukavemeti (MPa)
KNT2 % 0.1	1	4.30	8.01	1246.49	27.14
	2	4.29	7.98	1357.75	29.75
	3	4.36	8.00	1236.52	26.59
	4	4.39	8.00	1331.25	28.43
	5	4.30	7.97	1255.79	27.48
Ortalama					27.88
Standart sapma					1.24
KNT2 % 0.3	1	4.51	8.00	1192.31	24.78
	2	4.48	7.98	1225.23	25.70
	3	4.41	8.03	1222.37	25.89
	4	4.41	8.02	1291.12	27.38
	5	4.41	8.02	1250.39	26.52
Ortalama					26.05
Standart sapma					0.97
KNT2 % 0.5	1	4.20	7.97	1104.71	24.75
	2	4.47	8.01	1188.68	24.90
	3	4.42	8.16	1176.72	24.47
	4	4.31	7.98	1143.34	24.93
	5	4.37	7.97	1147.67	24.71
Ortalama					24.75
Standart sapma					0.18



Şekil 4.56 Ağırlıkça farklı oranlardaki KNT2 katkılı kompozit malzemelerin kuvvet-yer değiştirme grafikleri.



a) b) c)

Şekil 4.57 KNT2 katkılı kompozit malzemenin (% 0.1 oranı) boşlukları ve kırılma yüzeyini gösteren taramalı elektron mikroskobu görüntüleri.

Şekil 4.57’de % 0.1 oranını içeren KNT2 katkılı kompozit malzemenin tabakalar arası kayma mukavemeti testi sonucunda kırılma şekline ait taramalı elektron mikroskobu görüntüleri görülmektedir. Şekil 4.57a’da üretim esnasında oluşan hava kabarcıklarının yarattığı boşluklar göze çarpmaktadır. En büyük hasarlar gerilme yığılmasının olduğu bu boşlukların çevresinde meydana gelmiştir. Şekil 4.57b ve c’de ise nispeten kirli fiber yüzeyi görülmekle birlikte kırılmaların düz kesitlerde değil, eğik kesitlerde meydana geldiği bulunmuştur.

4.5.4 KNT3 karbon nanotüp katkı E-cam lifi/epoksi tabakalı kompozit malzemenin tabakalar arası kayma davranışı

KNT3 karbon nanotüp katkı numunelerin tabakalar arası kayma mukavemeti deneyi sonuçları Tablo 4.25’de görülmektedir. Tablo 4.25’e göre katkısız numune baz alındığında her bir oranda tabakalar arası kayma mukavemeti artmıştır. Katkısız numune ile kıyaslandığında % 0.1, 0.3 ve 0.5 oranlarında tabakalar arası kayma mukavemetinde sırasıyla % 3.44, 5.27 ve 7.25 artış meydana gelmiştir. Maksimum artış % 0.5 içerikli kompozit malzemededir.

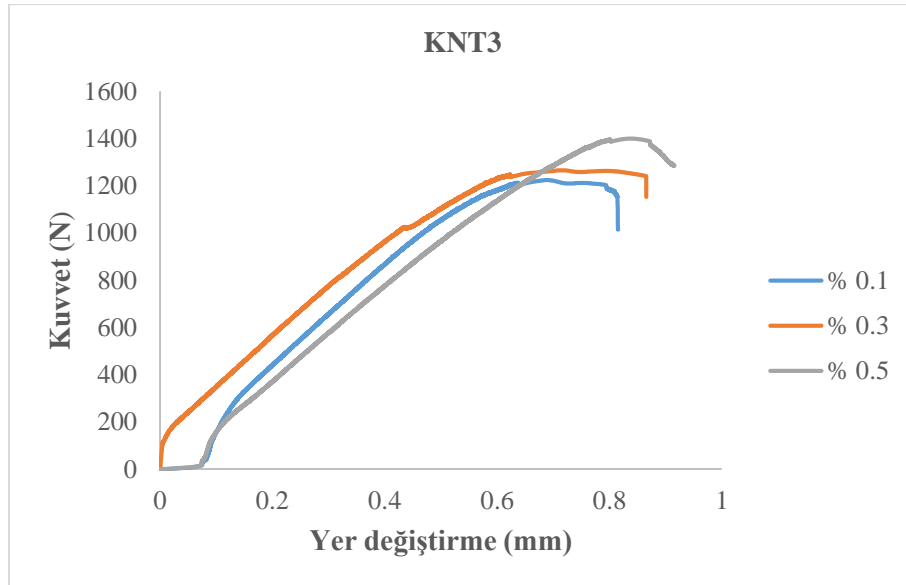
Literatürde yapılan çalışmalarda, Rahman vd., (2013) E-cam lifi/epoksi kompozit malzemeye fonksiyonlaştırılmış çok duvarlı karbon nanotüp ekleyerek tabakalar arası kayma dayanımını % 49 artırmışlardır. Lili vd., (2008) yüzey tedavisi yapılmış çok duvarlı karbon nanotüp takviyeli cam fiber/epoksi kompozitin tabakalar arası kayma dayanımının % 8.16 arttığını bulmuşlardır. Wang vd., (2013) karbon fiber/epoksiye fonksiyonlaştırılmış çok duvarlı karbon nanotüp ilave ederek tabakalar arası kayma mukavemetini % 34.2 artırmışlardır. Shen vd., (2014) fonksiyonlaştırılmış çok duvarlı karbon nanotüp takviyeli rami fiber/epoksi kompozitin tabakalar arası kayma dayanımının % 38 arttığını belirlemişlerdir. Sharma ve Shukla (2014) karbon fiber/epoksi kompozit malzemeye fonksiyonlaştırılmış çok duvarlı karbon nanotüp ekleyerek tabakalar arası kayma mukavemetini % 37 artırmışlardır.

Şekil 4.58’de ise KNT3 karbon nanotüp katkı kompozit malzemenin her bir oranı için kuvvet-yer değiştirme grafikleri karşılaştırmalı olarak görülmektedir. Taşıdıkları yük ve yer değiştirme açısından numunelerde birbirine paralel bir durum vardır. % 0.5 içerikli numune en fazla yükü taşıırken aynı zamanda maksimum yer değiştirmiştir. % 0.1 içerikli numune ise en az yükü taşıırken aynı zamanda minimum yer değiştirmiştir.

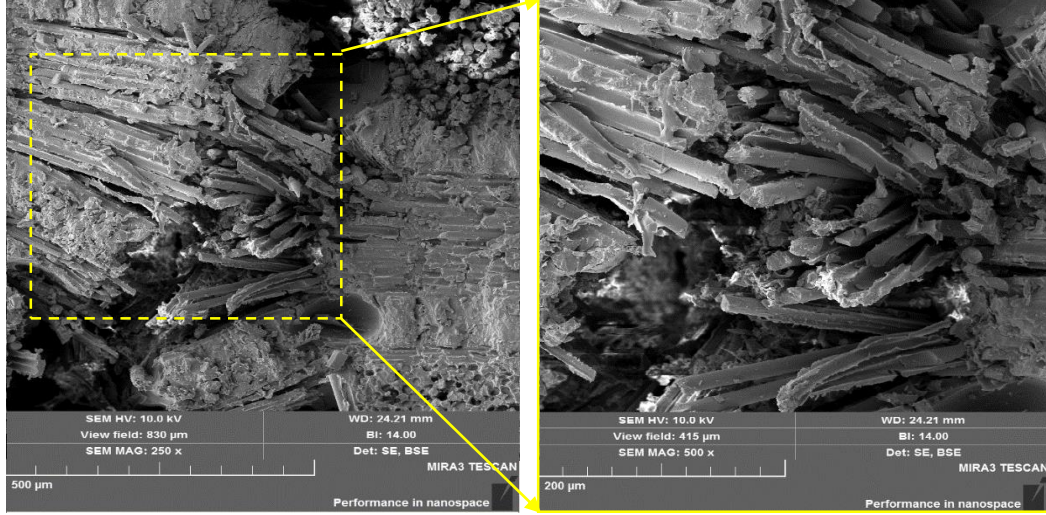
Şekil 4.59’da KNT3 katkı numunenin tabakalar arası kayma mukavemeti testi sonucunda kırılma yüzeyini içeren taramalı elektron mikroskobu görüntüleri görülmektedir. Kırılma yüzeyinde bazı bölgelerde hava boşlukları bulunmaktadır. Ayrıca fiberler üzerinde epoksi artıkları vardır ve fiberler tamamen kırılmıştır.

Tablo 4.25 KNT3 katkılı kompozit malzemelerin tabakalar arası kayma mukavemeti.

Numune Adı	Deney No	Kalınlık (mm)	Genişlik (mm)	Maksimum yük (N)	Tabakalar arası kayma mukavemeti (MPa)
KNT3 % 0.1	1	4.14	8.01	1189.35	26.90
	2	4.00	7.99	1224.00	28.72
	3	4.12	8.01	1175.44	26.71
	4	4.11	7.98	1202.78	27.50
	5	4.13	8.07	1272.64	28.64
Ortalama					27.69
Standart sapma					0.95
KNT3 % 0.3	1	4.45	7.99	1307.69	27.58
	2	4.40	7.99	1353.66	28.88
	3	4.38	8.00	1364.71	29.21
	4	4.30	7.96	1265.37	27.73
	5	4.14	7.99	1212.08	27.48
Ortalama					28.18
Standart sapma					0.81
KNT3 % 0.5	1	4.60	8.01	1399.60	28.49
	2	4.49	7.97	1392.05	29.18
	3	4.46	7.98	1393.76	29.37
	4	4.46	7.96	1340.83	28.33
	5	4.57	7.95	1363.95	28.16
Ortalama					28.71
Standart sapma					0.54



Şekil 4.58 Ağırlıkça farklı oranlardaki KNT3 katkılı kompozit malzemelerin kuvvet-yer değiştirme grafiğleri.



Şekil 4.59 % 0.5 oranında KNT3 içeren kompozit malzemenin kırılma yüzeyine ait taramalı elektron mikroskobu görüntüleri.

4.5.5 Nanokil katkılı E-cam lifi/epoksi tabakalı kompozit malzemenin tabakalar arası kayma davranışı

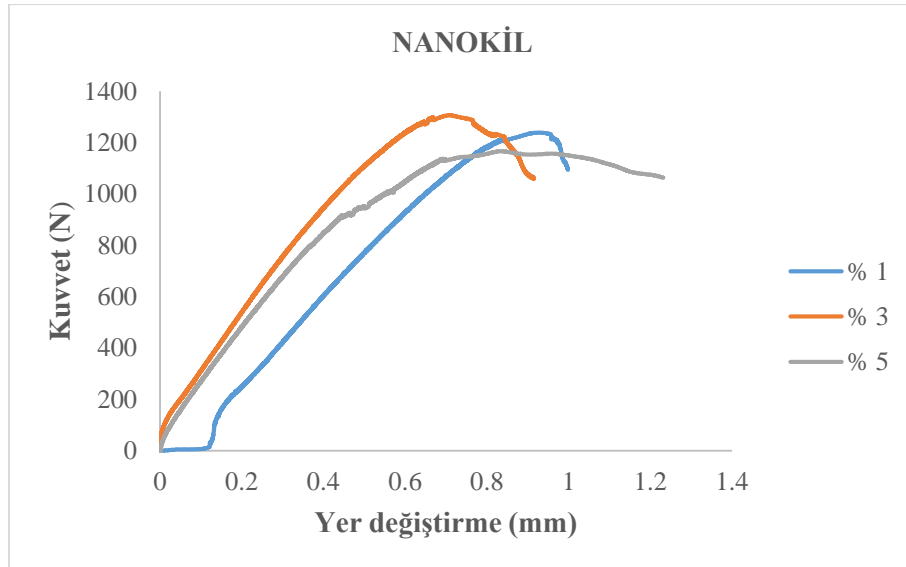
Nanokil katkılı numunelerin tabakalar arası kayma mukavemeti deneyi sonuçları Tablo 4.26'da görülmektedir. Katkısız numune ile karşılaştırıldığında tabakalar arası kayma mukavemeti % 1 ve 3 oranlarında sırasıyla % 4.78 ve 1.05 artmıştır. % 5 oranında ise tabakalar arası kayma mukavemetinde % 10.80 düşüş meydana gelmiştir. Minimum azalma % 5 oranını içeren kompozit malzemede görülmüştür.

Literatürde Mahesh vd., (2012) cam fiber/vinilester kompozite nanokil ekleyerek tabakalar arası kayma mukavemetini % 72 artırmışlardır. Chandradass vd., (2008) cam fiber takviyeli vinilester kompozitlere nanokil ilave ederek tabakalar arası kayma dayanımını artırmışlardır. Aktas ve Altan (2010) nanokil takviyeli E-cam lifi/su bazlı epoksinin tabakalar arası kayma dayanımının % 13.5 azaldığını bulmuşlardır. Bozkurt vd., (2007) cam fiber takviyeli kil/epoksi nanokompozitlerin tabakalar arası kayma mukavemetinin azaldığını tespit etmişlerdir.

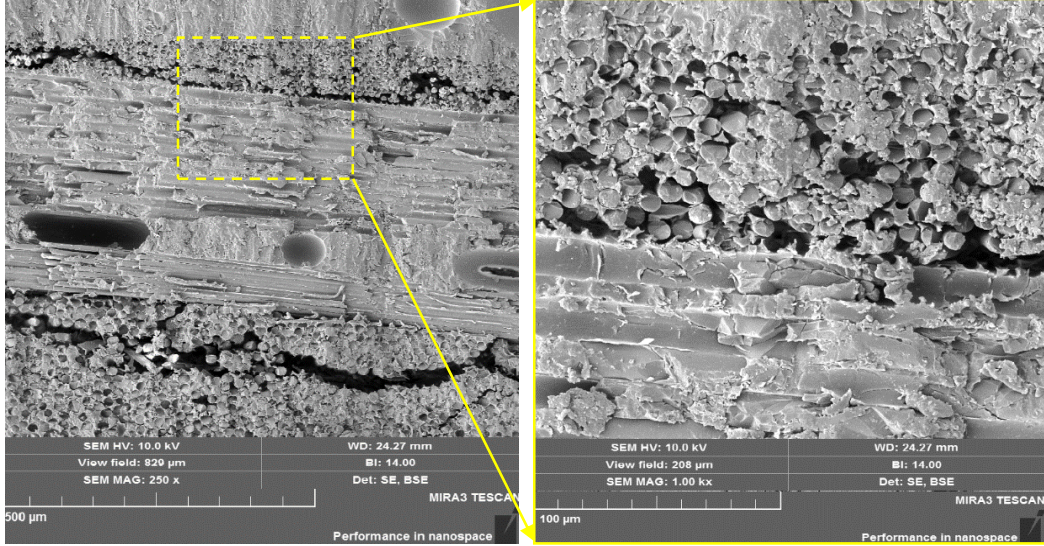
Şekil 4.60'da ise nanokil katkılı kompozit malzemenin her bir oranı için kuvvet-yer değiştirme grafikleri görülmektedir. Seçilen test örneklerine göre % 3 oranında numune üzerine en fazla yükü almış ve minimum yer değiştirmiştir. Ama bu numunenin kalınlığı % 1 oranına sahip olan numuneden fazladır. % 5 oranında ise numune en az yükü taşımış ve maksimum yer değiştirmiştir.

Tablo 4.26 Nanokil katkılı kompozit malzemelerin tabakalar arası kayma mukavemeti.

Numune Adı	Deney No	Kalınlık (mm)	Genişlik (mm)	Maksimum yük (N)	Tabakalar arası kayma mukavemeti (MPa)
Nanokil % 1	1	4.04	8.01	1238.78	28.71
	2	4.05	8.01	1170.20	27.05
	3	4.15	7.94	1199.01	27.29
	4	4.18	7.98	1289.21	28.99
	5	4.08	7.96	1221.94	28.22
Ortalama Standart sapma					28.05 0.86
Nanokil % 3	1	4.56	8.05	1306.26	26.69
	2	4.46	7.99	1323.22	27.85
	3	4.60	7.97	1236.40	25.29
	4	4.51	8.01	1332.76	27.67
	5	4.45	8.00	1316.75	27.74
Ortalama Standart sapma					27.05 1.09
Nanokil % 5	1	4.89	7.99	1210.65	23.24
	2	4.84	7.98	1271.33	24.69
	3	4.88	7.98	1201.71	23.14
	4	4.79	7.95	1253.21	24.68
	5	4.65	7.95	1166.38	23.66
Ortalama Standart sapma					23.88 0.76



Şekil 4.60 Ağırlıkça farklı oranlardaki nanokil katkılı kompozit malzemelerin kuvvet-yer değiştirme grafikleri.



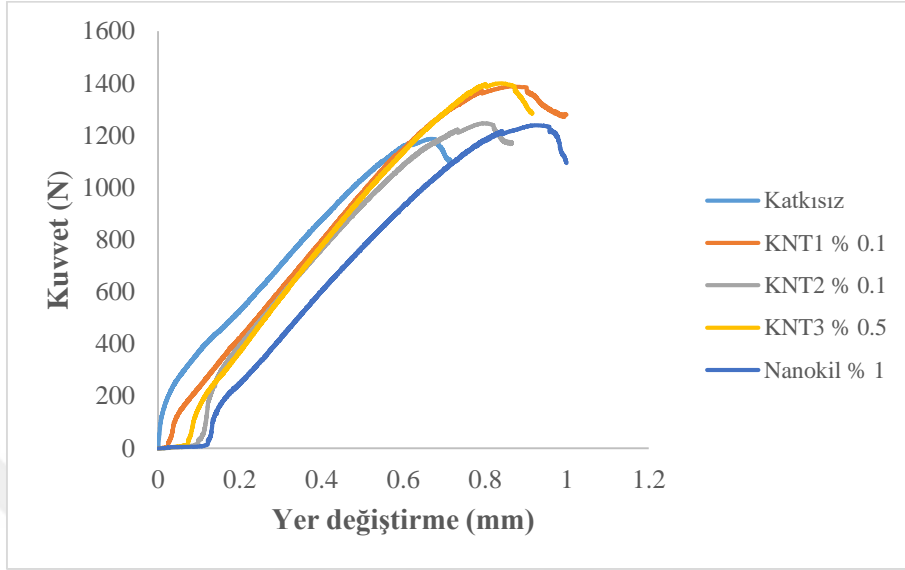
Şekil 4.61 Nanokil katkılı kompozit malzemenin (% 1 oranı) kırılma yüzeyine ait taramalı elektron mikroskobu görüntüleri.

Şekil 4.61’de nanokil katkılı kompozit malzemenin taramalı elektron mikroskobu görüntüleri görülmektedir. Şekil 4.61 incelendiğinde büyük boşluklar ve çatlaklara rastlanılmıştır. Ayrıca şekilde tabaka ayrışması da görülmektedir.

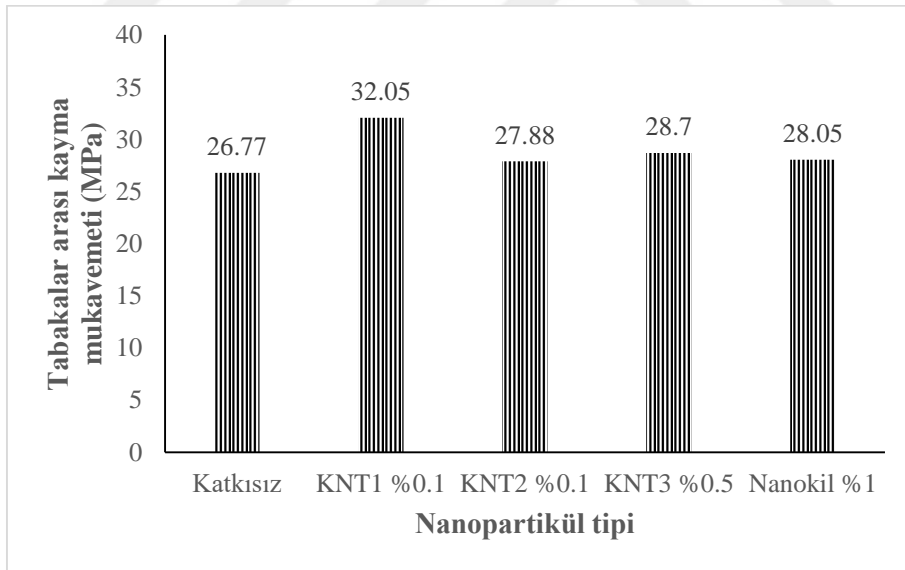
4.5.6 Nanopartikül katkılı kompozit malzemelerin tabakalar arası kayma mukavemetlerinin karşılaştırılması

Şekil 4.62’de katkısız ve nanopartikül katkılı kompozit malzemelerin en iyi özellikleri gösteren oranlarına ait kuvvet-yer değiştirme grafikleri görülmektedir. Şekil 4.62’ye göre katkısız numune baz alındığında nanopartiküllü numuneler daha fazla yük taşımıştır. Ayrıca KNT1 ve KNT3 karbon nanotüplü numuneler en fazla yükü üzerine almıştır. Şekil 4.63’de ise katkısız ve tüm nanopartikülleri içeren kompozit malzemeler sütun grafik olarak verilmiştir. Her bir nanopartikül için en iyi özellikleri gösteren oranlar seçilmiştir. Şekil 4.63’e göre tüm nanopartikül tipleri için tabakalar arası kayma mukavemeti artmıştır. Karbon nanotüpler kendi arasında değerlendirildiğinde, tabakalar arası kayma mukavemetindeki maksimum artış KNT1 ve minimum artış KNT2 karbon nanotüplü numunede meydana gelmiştir. Çapları aynı olan ancak uzunlukları birbirinden farklı olan iki nanotüp arasında kısa olan KNT1 karbon nanotüplü numune tabakalar arasındaki kaymaya karşı daha dirençlidir. Ayrıca iç çapı ve uzunluğu yaklaşık olarak aynı olan ve dış çapları farklı olan KNT2 ve KNT3 karbon nanotüplü numuneler arasında çok büyük bir fark yoktur. Elde edilen sonuçlardan, tabakalar arası kayma mukavemetindeki değişimde matris elemanın sorumlu olduğu görülmüştür. Aldousari (2016) nanopartikül

katkılı kompozit malzemeler üzerine yaptığı çalışmada delaminasyonun (tabakaların birbirinden ayrışması) matris baskın olduğunu belirtmiştir.



Şekil 4.62 Katkısız ve nanopartikül katkılı kompozit malzemelerin kuvvet-yer değiştirme grafikleri.



Şekil 4.63 Katkısız ve nanopartikül katkılı kompozit malzemelerin tabakalar arası kayma mukavemetlerinin karşılaştırılması.

5. YORUMLAR ve ÖNERİLER

Bu çalışmada katkısız ve nanopartikül takviyeli E-cam lifi/epoksi tabakalı kompozit malzemelerin üretimi yapılmış ve farklı mekanik özellikleri araştırılmıştır. Araştırmalarda ağırlıkça farklı oranlarda üç farklı tip fonksiyonlaştırılmış çok duvarlı karbon nanotüp ve nanokil matrise eklenerek çekme, kayma, esneklik ve tabakalar arası kayma davranışı incelenmiştir. Yapılan testlere göre aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

- Takviye doğrultusunda yapılan çekme testlerinde tüm nanopartikül tipleri için çekme mukavemeti azalmıştır. Çünkü takviye doğrultusunda çekme özelliklerinde fiber baskındır. Nanopartikül katkılı kompozitlerin takviye doğrultusunda elastisite modülü (KNT2'nin % 0.3 oranı dışında) azalırken, Poisson oranı artmıştır. Çekme mukavemetinde en büyük azalma nanokil takviyeli kompozitlerde görülmüştür. Dayanımda maksimum azalmalar, KNT2 karbon nanotüp hariç diğer nanopartiküllerde % 0.5 oranında meydana gelmiştir. Bunun nedeni viskozite artışının yarattığı olumsuz etkilerdir.
- Takviyeye dik doğrultuda yapılan çekme testlerinde ise çekme mukavemeti azalmakla birlikte elastisite modülü genellikle artmıştır. Mukavemette maksimum azalma KNT3 takviyeli kompozitlerde görülmüştür. Burada da % 0.5 oranına sahip nanopartikül katkılı kompozitler için viskozite artışına bağlı olarak maksimum düşüşler ortaya çıkmıştır. KNT1 ve KNT2 karbon nanotüplü kompozit malzemelerin elastisite modülünde artış meydana gelirken, KNT3 ve nanokil takviyeli olan kompozit malzemelerin elastisite modülünde ise önemli bir değişiklik yoktur. KNT1 ve KNT2 katkılı kompozitlerde takviyeye dik doğrultuda elastisite modülü oran arttıkça artmıştır.
- İosipescue kayma testlerinde nanopartikül takviyesi kompozit malzemelerin kayma özelliklerinde azalmaya neden olmuştur. Nanokil takviyeli kompozitler için mukavemette maksimum azalma görülmüştür. Hem karbon nanotüp hem de nanokil takviyeli kompozitlerde kayma mukavemeti azalırken, % 0.5 oranında KNT1 ve % 0.3 oranında KNT2 için kayma mukavemetindeki değişim önemsizdir.
- Matris baskın bir özellik olan esneklik mukavemeti, tüm nanopartikül tipleri ve oranları için (nanokilin % 3 oranı hariç) artmıştır. KNT1 katkılı kompozitin % 0.1 oranında % 34.75'lik maksimum artış olmuştur. Tüm nanopartikül tipleri için

KNT3 takviyeli kompozit malzeme dışında en düşük oranlarda maksimum iyileşme görülmüştür. Bunun nedeni viskozite artışı hava kabarcıklarının içeride kalmasını sağlamıştır. Hava kabarcıklarının oluşturduğu boşluklar da gerilme yığılmasına sebep olarak mukavemeti azaltmıştır.

- Tabakalı kompozitlere özgü bir özellik olan tabakalar arası kayma mukavemeti genel olarak nanopartikül takviyeli kompozitlerde artmıştır. Maksimum artış, ağırlıkça % 0.1 oranında KNT1 nanotüp içeren kompozit malzemede meydana gelmiştir (% 19.72). KNT3 katkılı kompozit malzeme haricinde KNT1, KNT2 ve nanokil katkılı kompozitler için oran arttıkça tabakalar arası kayma mukavemetindeki artış miktarı azalmıştır. Oran artışıyla birlikte viskozite artışı, hava boşluklarının oluşmasını sağlamıştır. Bu da erken hasara sebep olmuştur.

Bu sonuçlara göre matrise nanopartikül takviyesiyle kompozit malzemenin kalınlık doğrultusundaki düzlem dışı özelliklerinde artış sağlanırken, fiber özellikleriyle kontrol edilen mekanik özelliklerinde azalma olmuştur. Bundan sonra yapılacak olan çalışmalarda;

- Mekanik özelliklerin dışında nanopartikül takviyeli kompozitlerin elektriksel ve ısıl özellikleri araştırılabilir.
- Farklı karışım oranları ve farklı fonksiyonlaştırma yöntemleri için mekanik özellikler incelenebilir.
- Nanopartikül takviyeli kompozitlerin dinamik yükler altındaki davranışı incelenebilir.
- Nanopartikül içeren kompozit malzemelere ortam şartlarının etkisi araştırılabilir.

KAYNAKLAR

- Abot, J. L., Song, Y.** (2010). On the mechanical response of carbon nanotube array laminated composite materials. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 29(22), 3401–3410.
- Agubra, V. A., Owuor, P. S., Hosur, M. V.** (2013). Influence of nanoclay dispersion methods on the mechanical behavior of E-glass/epoxy nanocomposites. *Nanomaterials*, 3, 550–563.
- Aktas, L., Altan, M. C.** (2010a). Effect of nanoclay content on properties of glass–waterborne epoxy laminates at low clay loading. *Materials Science and Technology*, 26(5), 626–629.
- Aktas, L., Altan, M. C.** (2010b). Characterization of nanocomposite laminates fabricated from aqueous dispersion of nanoclay. *Polymer Composites*, 31(4), 620–629.
- Aldousari, S. M.** (2016). In-plane shear properties of nano-hybridized GFRE composites with MWCNTs. *British Journal of Applied Science & Technology*, 16(3), 1–14.
- Alnefaie, K. A., Aldousari, S. M., Khashaba, U. A.** (2013). New development of self-damping MWCNT composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 52, 1–11.
- Anand, A., Harshe, R., Joshi, M.** (2013). Resin film infusion: Toward structural composites with nanofillers. *Journal of Applied Polymer Science*, 129(3), 1618–1624.
- Anbusagar, N. R. R., Giridharan, P. K., Palanikumar, K.** (2014). Effect of nanomodified polyester resin on hybrid sandwich laminates. *Materials and Design*, 54, 507–514.
- Arai, M., Matsushita, K., Hirota, S.** (2011). Criterion for interlaminar strength of CFRP laminates toughened with carbon nanofiber interlayer. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 42, 703–711.
- Ashrafi, B., Díez-Pascual, A. M., Johnson, L., Genest, M., Hind, S., Martinez-Rubi, Y., Gonzalez-Dominguez, J. M., Martinez, M. T., Simard, B., Gomez-Fatou, M. A., Johnston, A.** (2012). Processing and properties of PEEK/glass fiber laminates: Effect of addition of single-walled carbon nanotubes. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 43, 1267–1279.
- ASTM D2344M-13** (2013). Standard test method for short-beam strength of polymer matrix composite materials and their laminates. *American Society for Testing and Materials*, West Conshohocken.
- ASTM D3039M-14.** (2014). Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials. *American Society for Testing and Materials*, West Conshohocken.
- ASTM D3410M-03R08** (2008). Standard test method for compressive properties of polymer matrix composite materials with unsupported gage section by shear loading. *American Society for Testing and Materials*, West Conshohocken.
- ASTM D3518M-13** (2013). Standard test method for in-plane shear response of polymer matrix composite materials by tensile test of a $\pm 45^\circ$ laminate. *American Society for Testing and Materials*, West Conshohocken.
- ASTM D5379M-12** (2012). Standard test method for shear properties of composite materials by the V-notched beam method. *American Society for Testing and Materials*, West Conshohocken.

- ASTM D790-15** (2015). Standard test methods for flexural properties of unreinforced and reinforced plastics and electrical insulating materials. *American Society for Testing and Materials*, West Conshohocken.
- Aurilia, M., Sorrentino, L., Berardini, F., Sawalha, S., Iannace, S.** (2011). Mechanical properties of nano/micro multilayered thermoplastic composites based on PP matrix. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 25(7), 835–849.
- Bashar, M., Mertiny, P., Sundararaj, U.** (2014). Effect of nanocomposite structures on fracture behavior of epoxy-clay nanocomposites prepared by different dispersion methods. *Journal of Nanomaterials*, <http://doi.org/10.1155/2014/312813>.
- Bortz, D. R., Merino, C., Martin-Gullon, I.** (2011). Mechanical characterization of hierarchical carbon fiber/nanofiber composite laminates. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 42, 1584–1591.
- Bozkurt, E., Kaya, E., Tanoğlu, M.** (2007). Mechanical and thermal behavior of non-crimp glass fiber reinforced layered clay/epoxy nanocomposites. *Composites Science and Technology*, 67, 3394–3403.
- Chandradass, J., Ramesh Kumar, M., Velmurugan, R.** (2008). Effect of clay dispersion on mechanical, thermal and vibration properties of glass fiber-reinforced vinyl ester composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 27(15), 1585–1601.
- Chen, Q., Zhang, L., Rahman, A., Zhou, Z., Wu, X. F., Fong, H.** (2011). Hybrid multi-scale epoxy composite made of conventional carbon fiber fabrics with interlaminar regions containing electrospun carbon nanofiber mats. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 42, 2036–2042.
- Chen, W., Shen, H., Auad, M. L., Huang, C., Nutt, S.** (2009). Basalt fiber-epoxy laminates with functionalized multi-walled carbon nanotubes. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 40, 1082–1089.
- Chisholm, N., Mahfuz, H., Rangari, V. K., Ashfaq, A., Jeelani, S.** (2005). Fabrication and mechanical characterization of carbon/SiC-epoxy nanocomposites. *Composite Structures*, 67, 115–124.
- Daud, W., Bersee, H. E. N., Picken, S. J., Beukers, A.** (2009). Layered silicates nanocomposite matrix for improved fiber reinforced composites properties. *Composites Science and Technology*, 69, 2285–2292.
- Davis, D. C., Wilkerson, J. W., Zhu, J., Ayewah, D. O. O.** (2010). Improvements in mechanical properties of a carbon fiber epoxy composite using nanotube science and technology. *Composite Structures*, 92, 2653–2662.
- Davis, D. C., Wilkerson, J. W., Zhu, J., Hadjiev, V. G.** (2011). A strategy for improving mechanical properties of a fiber reinforced epoxy composite using functionalized carbon nanotubes. *Composites Science and Technology*, 71, 1089–1097.
- Díez-Pascual, A. M., Ashrafi, B., Naffakh, M., González-Domínguez, J. M., Johnston, A., Simard, B., Martinez, M. T., Gómez-Fatou, M. A.** (2011). Influence of carbon nanotubes on the thermal, electrical and mechanical properties of poly(ether ether ketone)/glass fiber laminates. *Carbon*, 49, 2817–2833.
- Díez-Pascual, A. M., Naffakh, M.** (2012). Tuning the properties of carbon fiber-reinforced poly(phenylene sulphide) laminates via incorporation of inorganic nanoparticles. *Polymer*, 53, 2369–2378.
- Díez-Pascual, A. M., Naffakh, M.** (2013). Inorganic nanoparticle-modified poly(phenylene sulphide)/ carbon fiber laminates: Thermomechanical behaviour. *Materials*, 6, 3171–3193.

- Dong, Y., Chaudhary, D., Ploumis, C., Lau, K. T.** (2011). Correlation of mechanical performance and morphological structures of epoxy micro/nanoparticulate composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 42, 1483–1492.
- Dorigato, A., Pegoretti, A., Quaresimin, M.** (2011). Thermo-mechanical characterization of epoxy/clay nanocomposites as matrices for carbon/nanoclay/epoxy laminates. *Materials Science and Engineering A*, 528, 6324–6333.
- Fernández, C., Medina, C., Pincheira, G., Canales, C., Flores, P.** (2013). The effect of multiwall carbon nanotubes on the in-plane shear behavior of epoxy glass fiber reinforced composites. *Composites Part B: Engineering*, 55, 421–425.
- Garg, M., Sharma, S., Mehta, R.** (2015). Pristine and amino functionalized carbon nanotubes reinforced glass fiber epoxy composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 76, 92–101.
- Guo, J., Zhang, Q., Gao, L., Zhong, W., Sui, G., Yang, X.** (2017). Significantly improved electrical and interlaminar mechanical properties of carbon fiber laminated composites by using special carbon nanotube pre-dispersion mixture. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 95, 294–303.
- Guzman de Villoria, R., Hallander, P., Ydrefors, L., Nordin, P., Wardle, B. L.** (2016). In-plane strength enhancement of laminated composites via aligned carbon nanotube interlaminar reinforcement. *Composites Science and Technology*, 133, 33–39.
- Hossain, M. K., Hossain, M. E., Dewan, M. W., Hosur, M., Jeelani, S.** (2013). Effects of carbon nanofibers (CNFs) on thermal and interlaminar shear responses of E-glass/polyester composites. *Composites Part B: Engineering*, 44, 313–320.
- Hossain, M. K., Chowdhury, M. M. R., Salam, M. B., Malone, J., Hosur, M. V., Jeelani, S., Bolden, N. W.** (2014). Improved thermomechanical properties of carbon fiber reinforced epoxy composite using amino functionalized XDCNT. *Journal of Applied Polymer Science*, 131(17), 8737–8748.
- Hossain, M. K., Chowdhury, M. M. R., Salam, M. B. A., Jahan, N., Malone, J., Hosur, M. V., Jeelani, S., Bolden, N. W.** (2015). Enhanced mechanical properties of carbon fiber/epoxy composites by incorporating XD-grade carbon nanotube. *Journal of Composite Materials*, 49(18), 2251–2263.
- Inam, F., Wong, D. W. Y., Kuwata, M., Peijs, T.** (2010). Multiscale hybrid micro-nanocomposites based on carbon nanotubes and carbon fibers. *Journal of Nanomaterials*, <http://doi.org/10.1155/2010/453420>.
- Islam, M. E., Mahdi, T. H., Hosur, M. V., Jeelani, S.** (2015). Characterization of carbon fiber reinforced epoxy composites modified with nanoclay and carbon nanotubes. *Procedia Engineering*, 105, 821–828.
- Jagannathan, N., Bojja, R., Revathi, A., Srihari, S., Manjunatha, C. M.** (2015). Mechanical properties of a hybrid nanocomposite under room temperature and hot-wet environments. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 68(3), 363–369.
- Jenkins, C.H.** (1998). Manual on Experimental Methods for Mechanical Testing of Composites. *Fairmont Press*, 264p, United States of America.
- Jia, X., Li, G., Liu, B., Luo, Y., Yang, G., Yang, X.** (2013). Multiscale reinforcement and interfacial strengthening on epoxy-based composites by silica nanoparticle-multiwalled carbon nanotube complex. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 48, 101–109.

- Jia, X., Zhu, J., Li, W., Chen, X., Yang, X.** (2015). Compressive and tensile response of CFRP cylinders induced by multi-walled carbon nanotubes. *Composites Science and Technology*, 110, 35–44.
- Jones, R. M.** (1975). Mechanics of Composite Materials. *Scripta Book Company*, 355p, Washington, D.C.
- Kandare, E., Khatibi, A. A., Yoo, S., Wang, R., Ma, J., Olivier, P., Gleizes, N., Wang, C. H.** (2015). Improving the through-thickness thermal and electrical conductivity of carbon fibre/epoxy laminates by exploiting synergy between graphene and silver nano-inclusions. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 69, 72–82.
- Kanny, K., Mohan, T. P.** (2014). Resin infusion analysis of nanoclay filled glass fiber laminates. *Composites Part B: Engineering*, 58, 328–334.
- Karippal, J. J., Murthy, H. N. N., Rai, K. S., Sreejith, M., Krishna, M.** (2011). Study of mechanical properties of epoxy/glass/nanoclay hybrid composites. *Journal of Composite Materials*, 45(18), 1893–1899.
- Kelkar, A. D., Tian, Q., Yu, D., Zhang, L.** (2016). Boron nitride nanoparticle enhanced preregs: A novel route for manufacturing aerospace structural composite laminate. *Materials Chemistry and Physics*, 176, 136–142.
- Kharitonov, A. P., Tkachev, A. G., Blohin, A. N., Dyachkova, T. P., Kobzev, D. E., Maksimkin, A. V., Mostovoy, A. S., Alekseiko, L. N.** (2016). Reinforcement of Bisphenol-F epoxy resin composites with fluorinated carbon nanotubes. *Composites Science and Technology*, 134, 161–167.
- Khashaba, U. A.** (2014). Development and characterization of high performance nano-hybrid GFRE composites for structural applications. *Composite Structures*, 116, 523–534.
- Khosravi, H., Eslami-Farsani, R.** (2015). On the mechanical characterizations of unidirectional basalt fiber/epoxy laminated composites with 3-glycidoxypropyltrimethoxysilane functionalized multi-walled carbon nanotubes-enhanced matrix. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 35(5), 421–434.
- Kim, S. K., Kim, J. T., Kim, H. C., Rhee, K. Y., Kathi, J.** (2012). Thermal and mechanical properties of epoxy/carbon fiber composites reinforced with multi-walled carbon nanotubes. *Journal of Macromolecular Science, Part B: Physics*, 51, 358–367.
- Kobayashi, S., Kitagawa, J.** (2016). Effect of fine particle incorporation into matrix on mechanical properties of plain woven carbon fiber reinforced plastics fabricated with vacuum assisted resin transfer molding. *Composites Part B: Engineering*, 85, 31–40.
- Kornmann, X., Rees, M., Thomann, Y., Necola, A., Barbezat, M., Thomann, R.** (2005). Epoxy-layered silicate nanocomposites as matrix in glass fibre-reinforced composites. *Composites Science and Technology*, 65, 2259–2268.
- Kulkarni, M., Carnahan, D., Kulkarni, K., Qian, D., Abot, J. L.** (2010). Elastic response of a carbon nanotube fiber reinforced polymeric composite: A numerical and experimental study. *Composites Part B: Engineering*, 41, 414–421.
- Li, W., Dichiara, A., Zha, J., Su, Z., Bai, J.** (2014). On improvement of mechanical and thermo-mechanical properties of glass fabric/epoxy composites by incorporating CNT-Al₂O₃ hybrids. *Composites Science and Technology*, 103, 36–43.
- Lili, S., Yan, Z., Yuexin, D., Zuoguang, Z.** (2008). Interlaminar shear property of modified glass fiber-reinforced polymer with different MWCNTs. *Chinese Journal of Aeronautics*, 21, 361–369.

- Liu, L., Zhang, H., Zhou, Y.** (2014). Quasi-static mechanical response and corresponding analytical model of laminates incorporating with nanoweb interlayers. *Composite Structures*, 111, 436–445.
- Liu, N., Wang, J., Yang, J., Han, G., Yan, F.** (2014). Enhancement on interlaminar shear strength and water-lubricated tribological performance of high-strength glass fabric/phenolic laminate by the incorporation of carbon nanotubes. *Polymers Advanced Technologies*, 25, 1572–1579.
- Liu, W., Li, L., Zhang, S., Yang, F., Wang, R.** (2017). Mechanical properties of carbon nanotube/carbon fiber reinforced thermoplastic polymer composite. *Polymer Composites*, 38(9), 2001–2008.
- Mahesh, K. R. V., Murthy, H. N. N., Kumaraswamy, B. E., Sridhar, R., Krishna, M., Sherigara, B. S.** (2012). The influence of montmorillonite on mechanical, thermal and fire retardation properties of vinyl ester/glass composites. *Journal of Composite Materials*, 47(17), 2163–2178.
- Mahrholz, T., Stängle, J., Sinapius, M.** (2009). Quantitation of the reinforcement effect of silica nanoparticles in epoxy resins used in liquid composite moulding processes. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 40, 235–243.
- McCrary-Dennis, M. C. L., Okoli, O. I.** (2012). A review of multiscale composite manufacturing and challenges. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 31(24), 1687–1711.
- Meguid, S. A., Sun, Y.** (2004). On the tensile and shear strength of nano-reinforced composite interfaces. *Materials and Design*, 25, 289–296.
- Muthu, J., Dendere, C.** (2014). Functionalized multiwall carbon nanotubes strengthened GRP hybrid composites: Improved properties with optimum fiber content. *Composites Part B: Engineering*, 67, 84–94.
- Naghshpour, A., Hoa, S. V.** (2013). In situ monitoring of through-thickness strain in glass fiber/epoxy composite laminates using carbon nanotube sensors. *Composites Science and Technology*, 78, 41–47.
- Nam, T. H., Goto, K., Nakayama, H., Oshima, K., Premalal, V., Shimamura, Y., Inoue, Y., Naito, K., Kobayashi, S.** (2014). Effects of stretching on mechanical properties of aligned multi-walled carbon nanotube/epoxy composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 64, 194–202.
- Phonthammachai, N., Li, X., Wong, S., Chia, H., Tjiu, W. W., He, C.** (2011). Fabrication of CFRP from high performance clay/epoxy nanocomposite: Preparation conditions, thermal-mechanical properties and interlaminar fracture characteristics. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 42, 881–887.
- Pol, M. H., Liaghat, G. H.** (2017). Studies on the mechanical properties of composites reinforced with nanoparticles. *Polymer Composites*, 38(1), 205–212.
- Rahman, M. M., Zainuddin, S., Hosur, M. V., Robertson, C. J., Kumar, A., Trovillion, J., Jeelani, S.** (2013). Effect of NH₂-MWCNTs on crosslink density of epoxy matrix and ILSS properties of E-glass/epoxy composites. *Composite Structures*, 95, 213–221.
- Rahman, M. M., Hosur, M., Zainuddin, S., Jahan, N., Miller-Smith, E. B., Jeelani, S.** (2015). Enhanced tensile performance of epoxy and E-glass/epoxy composites by randomly-oriented amino-functionalized MWCNTs at low contents. *Journal of Composite Materials*, 49(7), 759–770.

- Rao, P. S., Renji, K., Bhat, M. R., Mahapatra, D. R., Narayana Naik, G. N.** (2015). Mechanical properties of CNT-Bisphenol e cyanate ester-based CFRP nanocomposite developed through VARTM process. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 34(12), 1000–1014.
- Salam, M. B. A., Hosur, M. V., Jahan, N., Rahman, M., Jeelani, S.** (2013). Improvement in mechanical and thermo-mechanical properties of carbon fibre/epoxy composites using carboxyl functionalized multi-walled carbon nanotubes. *Polymers and Polymer Composites*, 21(8), 495–507.
- Seretis, G. V., Kouzilos, G., Manolakos, D. E., Provatidis, C. G.** (2017). On the graphene nanoplatelets reinforcement of hand lay-up glass fabric/epoxy laminated composites. *Composites Part B: Engineering*, 118, 26–32.
- Seretis, G. V., Nitodas, S. F., Mimigianni, P. D., Kouzilos, G. N., Manolakos, D. E., Provatidis, C. G.** (2018). On the post-curing of graphene nanoplatelets reinforced hand lay-up glass fabric/epoxy nanocomposites. *Composites Part B: Engineering*, 140, 133–138.
- Shan, F. L., Gu, Y. Z., Li, M., Liu, Y. N., Zhang, Z. G.** (2013). Effect of deposited carbon nanotubes on interlaminar properties of carbon fiber-reinforced epoxy composites using a developed spraying processing. *Polymer Composites*, 34(1), 41–50.
- Sharma, K., Shukla, M.** (2014). Three-phase carbon fiber amine functionalized carbon nanotubes epoxy composite: Processing, characterisation, and multiscale modeling. *Journal of Nanomaterials*, <http://doi.org/10.1155/2014/837492>.
- Shen, M. Y., Chang, T. Y., Hsieh, T. H., Li, Y. L., Chiang, C. L., Yang, H., Yip, M. C.** (2013). Mechanical properties and tensile fatigue of graphene nanoplatelets reinforced polymer nanocomposites. *Journal of Nanomaterials*, <http://doi.org/10.1155/2013/565401>.
- Shen, X., Jia, J., Chen, C., Li, Y., Kim, J. K.** (2014). Enhancement of mechanical properties of natural fiber composites via carbon nanotube addition. *Journal of Materials Science*, 49, 3225–3233.
- Shen, Z., Bateman, S., Wu, D. Y., McMahon, P., Dell'Olio, M., Gotama, J.** (2009). The effects of carbon nanotubes on mechanical and thermal properties of woven glass fibre reinforced polyamide-6 nanocomposites. *Composites Science and Technology*, 69, 239–244.
- Shokrieh, M. M., Daneshvar, A., Akbari, S.** (2014a). Reduction of thermal residual stresses of laminated polymer composites by addition of carbon nanotubes. *Materials and Design*, 53, 209–216.
- Shokrieh, M. M., Saeedi, A., Chitsazzadeh, M.** (2014b). Evaluating the effects of multi-walled carbon nanotubes on the mechanical properties of chopped strand mat/polyester composites. *Materials and Design*, 56, 274–279.
- Subagia, I. D. G. A., Tijing, L. D., Kim, Y., Kim, C. S., Vista IV, F. P., Shon, H. K.** (2014). Mechanical performance of multiscale basalt fiber-epoxy laminates containing tourmaline micro/nano particles. *Composites Part B: Engineering*, 58, 611–617.
- Taheri-Behrooz, F., Esmkhani, M., Yaghoobi-Chatroodi, A., Ghoreishi, S. M.** (2016). Out-of-plane shear properties of glass/epoxy composites enhanced with carbon-nanofibers. *Polymer Testing*, 55, 278–286.
- Taraghi, I., Fereidoon, A., Zamani, M. M., Mohyeddin, A.** (2015). Mechanical, thermal, and viscoelastic properties of polypropylene/glass hybrid composites reinforced with multiwalled carbon nanotubes. *Journal of Composite Materials*, 49(28), 3557–3566.

- Tarfaoui, M., Lafdi, K., El Moumen, A.** (2016). Mechanical properties of carbon nanotubes based polymer composites. *Composites Part B: Engineering*, 103, 113–121.
- Tsai, J. L., Wu, M. D.** (2008). Organoclay effect on mechanical responses of glass/epoxy nanocomposites. *Journal of Composite Materials*, 42(6), 553–568.
- Tsai, J. L., Hsiao, H., Cheng, Y. L.** (2010). Investigating mechanical behaviors of silica nanoparticle reinforced composites. *Journal of Composite Materials*, 44(4), 505–524.
- Tüzemen, M. Ç., Salamcı, E., Avcı, A.** (2017). Enhancing mechanical properties of bolted carbon/epoxy nanocomposites with carbon nanotube, nanoclay, and hybrid loading. *Composites Part B: Engineering*, 128, 146–154.
- Ulus, H., Şahin, Ö. S., Avcı, A.** (2015). Enhancement of flexural and shear properties of carbon fiber/epoxy hybrid nanocomposites by boron nitride nano particles and carbon nano tube modification. *Fibers and Polymers*, 16(12), 2627–2635.
- Url-1** <<http://www.nanografi.com>>, alındığı tarih: 12.01.2017.
- Vargas, G., Ramos, J. Á., De Gracia, J., Ibarretxe, J., Mujika, F.** (2015). In-plane shear behaviour of multiscale hybrid composites based on multiwall carbon nanotubes and long carbon fibres. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 34(23), 1926–1936.
- Wang, B., Zhou, X., Yin, J., Wang, L.** (2013). Investigation on some matrix-dominated properties of hybrid multiscale composites based on carbon fiber/carbon nanotube modified epoxy. *Journal of Applied Polymer Science*, 128(2), 990–996.
- Wang, P. N., Hsieh, T. H., Chiang, C. L., Shen, M. Y.** (2015). Synergetic effects of mechanical properties on graphene nanoplatelet and multiwalled carbon nanotube hybrids reinforced epoxy/carbon fiber composites. *Journal of Nanomaterials*, <http://doi.org/10.1155/2015/838032>.
- Yasmin, A., Luo, J. J., Abot, J. L., Daniel, I. M.** (2006). Mechanical and thermal behavior of clay/epoxy nanocomposites. *Composites Science and Technology*, 66, 2415–2422.
- Ye, Y., Chen, H., Wu, J., Chan, C. M.** (2011). Evaluation on the thermal and mechanical properties of HNT-toughened epoxy/carbon fibre composites. *Composites Part B: Engineering*, 42, 2145–2150.
- Yokozeiki, T., Iwahori, Y., Ishiwata, S.** (2007a). Matrix cracking behaviors in carbon fiber/epoxy laminates filled with cup-stacked carbon nanotubes (CSCNTs). *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 38, 917–924.
- Yokozeiki, T., Iwahori, Y., Ishiwata, S., Enomoto, K.** (2007b). Mechanical properties of CFRP laminates manufactured from unidirectional prepreps using CSCNT-dispersed epoxy. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 38, 2121–2130.
- Zhang, J., Ju, S., Jiang, D., Peng, H. X.** (2013). Reducing dispersity of mechanical properties of carbon fiber/epoxy composites by introducing multi-walled carbon nanotubes. *Composites Part B: Engineering*, 54, 371–376.
- Zhou, Y., Pervin, F., Rangari, V. K., Jeelani, S.** (2006). Fabrication and evaluation of carbon nano fiber filled carbon/epoxy composite. *Materials Science and Engineering A*, 426, 221–228.
- Zhou, Y., Hosur, M., Jeelani, S., Mallick, P. K.** (2012). Fabrication and characterization of carbon fiber reinforced clay/epoxy composite. *Journal of Materials Science*, 47, 5002–5012.

Zhou, Y., Jeelani, S., Lacy, T. (2014). Experimental study on the mechanical behavior of carbon/epoxy composites with a carbon nanofiber-modified matrix. *Journal of Composite Materials*, 48(29), 3659–3672.

Zhu, J., Imam, A., Crane, R., Lozano, K., Khabashesku, V. N., Barrera, E. V. (2007). Processing a glass fiber reinforced vinyl ester composite with nanotube enhancement of interlaminar shear strength. *Composites Science and Technology*, 67, 1509–1517.



ÖZGEÇMİŞ



Kişisel bilgiler

Adı Soyadı	Sakine KIRATLI
Doğum Yeri ve Tarihi	Divriği, 25.07.1984
Medeni Hali	Bekâr
Yabancı Dil	İngilizce
İletişim Adresi	Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü 58140 Sivas
E-posta Adresi	skiratli@cumhuriyet.edu.tr skiratli84@gmail.com

Eğitim ve Akademik Durumu

Lisans	Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, 2006
Yüksek Lisans	Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, 2012

İş Tecrübesi

Küveli Asansör A.Ş.	Yetkili Mühendis, 2007 - 2009
Sivas Cumhuriyet Üniversitesi	Araştırma Görevlisi, 2009 -

Yayınlar

Kıratlı, S., Aslan, Z. (2018). Flexural behavior of graphene nanoplatelets reinforced cross-ply E-glass/epoxy laminated composite materials. *Cumhuriyet Science Journal*, 39-2, 531-542.

Koser, K., Aslan, Z., Gülyaz, S., Demir, A., Kıratlı, S. (2013). Tansör Hesaba Giriş ve Uygulamaları. *Nobel Akademik Yayıncılık*, 232s.

Kongreler ve Bildiriler

Kıratlı, S., Aslan, Z. (2017). Grafen nanopul takviyeli çapraz katlı E-cam lifi/epoksi tabakalı kompozit malzemelerin eğilme davranışı. *2 st International Congress on Engineering Architecture and Design*, 587-588 (Özet bildiri/Sözlü sunum).

Kıratlı, S., Darıcık, F., Aslan, Z. (2017). Farklı ortam sıcaklıklarının E-cam lifi/epoksi tabakalı kompozit malzemelerin esneklik davranışına etkisi. *International Advanced Researches & Engineering Congress*, 342-351 (Tam metin bildiri/Sözlü sunum).

Projeler

Nanopartikül Takviyeli E-cam lifi/Epoksi Kompozit Malzeme Üretimi ve Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi, Cumhuriyet Üniversitesi BAP, Araştırmacı, 13/05/2015 (Devam Ediyor) (ULUSAL)

