



T.C.
NECMETTİN ERBAKAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



KNT VE SiO₂ NANOPARTİKÜL İLE
MODİFİYE EDİLMİŞ KARBON-CAM
ELYAF/EPOKSİ KOMPOZİT PLAKALARIN
MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN
İNCELENMESİ

Muhammed Bahadır ÇALIŞKAN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Ocak-2021
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

KNT VE SiO₂ NANOPARTİKÜL İLE MODİFİYE EDİLMİŞ KARBON-CAM ELYAF/EPOKSİ KOMPOZİT PLAKALARIN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Muhammed Bahadır ÇALIŞKAN

**Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Danışman: Doç. Dr. Lokman GEMİ
Dr. Öğr. Üyesi Şakir YAZMAN**

2021, 108 Sayfa

**Jüri
Prof. Dr. Uğur KÖKLÜ
Doç. Dr. Lokman GEMİ
Doç. Dr. Ahmet CAN**

Bu çalışmada; nanopartiküller ile modifiye edilmiş reçine kullanılarak cam elyaf/epoksi ve karbon elyaf/epoksi kompozit malzeme üretilmiştir. Üretilen saf ve nano takviyeli numunelerin mekanik özellikleri incelenmiştir. Kompozit malzeme üretiminde kullanılan reçine içerisine ağırlıkça % 0.5, 1, 1.5 ve 2 oranlarında çok cidarlı karbon nanotüp (ÇCKNT) ve aynı oranlarda silisyum dioksit (SiO₂) katılmıştır. Çalışmada ilk olarak, kullanılan reçineyi modifiye edecek uygun nanopartikül oranını belirlemek için epoksi/nanopartikül kompozit numunelerinin üretimi yapılmış ve üretilen numuneler çekme testine tabii tutularak uygun nano oranları belirlenmiştir. Bu oran KNT için %1 olurken SiO₂ için %1.5 olarak bulunmuştur. Çalışmanın ikinci aşamasında uygun ilave oranı kullanılarak KNT ve SiO₂ nanopartikül ilaveli cam, karbon ve hibrit elyaf takviyeli tabakalı kompozitler üretilmiş ve nanopartikül ilavesinin epoksi/elyaf sistemine etkisi incelenmiştir. İkinci aşamada üretim vakum torbalama yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. ASTM standartlarına uygun olarak hazırlanan tabakalı kompozit numuneler çekme ve üç nokta eğme deneylerine tabii tutulmuştur. Çekme mukavemetinde saf epoksi matrisli tabakalı kompozite göre %1.5 SiO₂ nanopartikül takviyeli cam elyaflı plakada %2.5, %1 KNT takviyeli karbon elyaflı plakada %10.2 artış olurken en iyi artış hibrit nanopartikül takviyeli hibrit elyaflı plakada %30.8 artış ile görülmüştür. Üç nokta eğme testi sonuçlarında ise saf epoksiye göre eğilme mukavemetinde %1 KNT takviyeli karbon elyaflı plakada %14.58, %1.5 SiO₂ takviyeli cam elyaflı plakada %32.30 oranında düşüş elde edilirken hibrit nanopartikül takviyeli hibrit elyaflı plakada %8.47 oranında artış sağlanmıştır. Numunelerin kırık yüzeyleri optik mikroskop ile incelenmiş ve kompozitlerde oluşan hasar mekanizmaları araştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Çekme testi, Eğme testi, Nanokompozit, Nanopartikül, KNT, SiO₂

ABSTRACT

MS THESIS

INVESTIGATION OF MECHANICAL PROPERTIES OF CARBON-GLASS FIBER/EPOXY LAMINATED COMPOSITE PLATES MODIFIED WITH CNT AND SiO₂ NANOPARTICLES

Muhammed Bahadır ÇALIŞKAN

**THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF
NECMETTİN ERBAKAN UNIVERSITY
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE
IN MECHANICAL ENGINEERING**

**Advisor: Assoc. Prof. Dr. Lokman GEMİ
Asst. Prof. Dr. Şakir YAZMAN**

2021, 108 Pages

**Jury
Prof. Dr. Uğur KÖKLÜ
Assoc. Prof. Dr. Lokman GEMİ
Assoc. Prof. Dr. Ahmet CAN**

In this study, Glass fiber/epoxy and carbon fiber/epoxy composite materials were produced using resin modified with nanoparticles. The mechanical properties of neat (non-reinforced) and nano-reinforced samples were investigated. In the resin used in the production of composite materials, 0.5, 1, 1.5 and 2% by weight of multi-walled carbon nanotube (MWCNT) and silicon dioxide (SiO₂) in the same proportions were added. Firstly, epoxy/nanoparticle composite samples were produced in order to determine the appropriate nanoparticle ratio to modify the resin, and appropriate nano ratios were determined by applying tensile test to the samples produced. While this ratio was 1% for CNT, it was found to be 1.5% for SiO₂. In the second phase of the study, CNT and SiO₂ nanoparticle added glass, carbon and hybrid fiber reinforced layered composites were produced with appropriate addition ratio and the effect of nanoparticle addition on the epoxy/fiber system was investigated. In the second stage, the production was carried out by vacuum bagging method. Layered composite samples prepared in accordance with ASTM standards were subjected to tensile and three-point bending tests. The tensile strength increased by 2.5% in 1.5% SiO₂ nanoparticle reinforced glass fiber plate and 10.2% in 1% CNT reinforced carbon fiber plate compared to neat epoxy matrix layered composite, while the best increase was seen in hybrid nanoparticle reinforced hybrid fiber plate by 30.8%. As a result of the three-point bending test, compared to neat epoxy sample, 14.58% and 32.30% decrease were obtained in 1% CNT reinforced carbon fiber plate and 1.5% SiO₂ reinforced glass fiber plate respectively, while an increase of 8.47% was achieved in hybrid nanoparticle reinforced hybrid fiber plate. The damage formation mechanism in composites was also investigated by optical microscopy by examining broken surfaces.

Keywords: CNT, Nanocomposite, Nanoparticle, SiO₂, Tensile test, Bending tests

ÖNSÖZ

Çalışmalarım boyunca maddi-manevi desteğini, rehberliğini, tavsiye ve teşviklerini eksik etmeyen, sabır ve hoşgörü anlayışı ile tüm zorluklarda yanımda olan danışman hocam Doç. Dr. Lokman GEMİ'ye minnet ve teşekkürü borç bilirim.

Çalışma süresince yardımını esirgemeyen ve tez çalışması boyunca bana yardımcı olan ikinci danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Şakir YAZMAN'a teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Deneylerin yapılmasında labaratuvar imkânlarını kullandığımız ve deney aşamasında yardımlarını esirgemeyen Prof. Dr. Uğur KÖKLÜ ve Arş. Gör. Sezer MORKAVUK hocalarıma teşekkürü bir borç bilirim.

Gece gündüz demeden desteğini hiç eksik etmeyen aileme vefa ve teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans çalışmama 191335001 nolu proje ile maddi destek sağlayan Necmettin Erbakan Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğüne de teşekkürü bir borç bilirim.

Muhammed Bahadır ÇALIŞKAN
KONYA-2021

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ	ix
ÇİZELGELER LİSTESİ	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR	xii
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	4
3. KURAMSAL TEMELLER	12
3.1. Kompozit Malzemeler	12
3.1.1. Polimer matrisli kompozitler	13
3.1.1.1. Polimer kompozit matris malzemeleri	16
3.1.1.1.1. Termoplastik malzemeleri	17
3.1.1.1.2. Termoset malzemeleri.....	18
3.1.1.2. Polimer kompozit takviye malzemeleri	19
3.1.1.2.1. Karbon nanotüp.....	20
3.1.1.2.2. Nano SiO ₂	21
3.1.1.2.3. Cam elyaflar.....	22
3.1.1.2.4. Karbon elyaflar	24
3.1.1.2.5. Aramid elyaflar	25
3.1.1.3. Polimer kompozit malzemelerin dayanım bileşenleri	26
3.1.1.3.1. Elyaf/reçine hacimsel oranı	26
3.1.1.3.2. Elyaf yönü.....	26
3.1.1.3.3. Elyaf-matris arayüzeyi	27
3.1.1.3.4. Elyaf çapı ve boy/çap oranı	27
3.1.1.3.5. Üretim yöntemi ve mikroyapı kusurları.....	28
3.1.2. Polimer matrisli kompozitlerin üretim yöntemleri	28
3.1.2.1. El yatırma yöntemi.....	29
3.1.2.2. Püskürtme yöntemi	30
3.1.2.3. Reçine transfer kalıplama yöntemi	31
3.1.2.4. Elyaf sarma yöntemi	32
3.1.2.5. Pultrüzyon yöntemi.....	33
3.1.2.1. Vakum torbalama yöntemi.....	33
4. MATERYAL VE YÖNTEM.....	36
4.1. Malzemeler ve Özellikleri	36
4.2. Epoksi/Nanopartikül Kompozit Numunelerin Üretilmesi	38
4.3. Epoksi/Nanopartikül Kompozitin Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi	40
4.4. Kompozit Plakaların Üretimi	41
4.5. Tabakalı Kompozit Plakaların Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi	44

5. BULGULARI VE TARTIŞMA	45
5.1. Epoksi/Nanopartikül Nanokompozitin Mekanik Özellikleri	45
5.2. Nanokompozitlerin Hasar Analizi	51
5.3. Tabakalı Kompozitlerin Mekanik Özellikleri.....	54
5.3.1. Tabakalı kompozit plakaların çekme testi	54
5.3.2. Tabakalı kompozit plakaların çekme testi sonrası hasar analizi.....	62
5.3.3. Tabakalı kompozitlerin üç nokta eğme testi	68
5.3.4. Tabakalı kompozitlerin üç nokta eğme testi sonrası hasar analizi.....	74
6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	85
6.1. Sonuçlar	85
6.2. Öneriler	86
KAYNAKLAR	87
ÖZGEÇMİŞ	96



ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Ultrasonik karıştırma prensibi	5
Şekil 2.2. Farklı üretim yöntemlerinin cam ve karbon elyaf takviyeli polimer kompozitlerin mekanik özellikleri üzerindeki etkileri.	9
Şekil 3.1. Kompozitlerin takviye malzemesi yapısına göre sınıflandırılması: a) elyaf takviyeli, b) parçacık takviyeli, c) tabakalı, d) karma (hibrit).	13
Şekil 3.2. Polimerlerin sınıflandırılması.....	16
Şekil 3.3. Termoplastik ve Termoselerin moleküler yapıları.	17
Şekil 3.4. Tek cidarlı ve çok cidarlı karbon nanotüp yapısı	20
Şekil 3.5. a) Grafen yapısı b) Grafit yapısı.....	21
Şekil 3.6. Hidrofilik nano SiO ₂	22
Şekil 3.7. Cam elyaf dokuma kumaş	24
Şekil 3.8. Karbon elyaf dokuma kumaş.....	25
Şekil 3.9. Aramid elyaf dokuma kumaş	26
Şekil 3.10. El yatırma yöntemi	30
Şekil 3.11. Püskürtme yöntemi.....	31
Şekil 3.12. Reçine transfer kalıplama yöntemi.....	32
Şekil 3.13. Elyaf sarma yöntemi.....	32
Şekil 3.14. Pultrüzyon yöntemi	33
Şekil 3.15. Vakum torbalama yöntemi	34
Şekil 4.1. SiO ₂ ve ÇCKNT'lerin TEM görüntüleri.....	38
Şekil 4.2. ASTM D 638-14 test numunesi ölçüleri	39
Şekil 4.3. Çekme numunelerinin üretim aşaması	40
Şekil 4.4. Vakum torbalama işlemi şematik gösterimi.....	41
Şekil 4.5. Tabakalı kompozitlerin katman yapısı	43
Şekil 4.6. Çekme ve eğme numunelerinin boyutlandırılması.....	44
Şekil 5.1. KNT ilaveli epoksi kompozitlerin çekme gerilmesi–birim şekil değiştirme grafiği.....	45
Şekil 5.2. SiO ₂ ilaveli epoksi kompozitlerin çekme gerilmesi–birim şekil değiştirme grafiği.....	46
Şekil 5.3. Nanokompozitlerin çekme mukavemeti değerleri	47
Şekil 5.4. Nanokompozitlerin yüzde uzama değerleri.....	47
Şekil 5.5. Nanokompozitlerin statik tokluk değerleri.....	48
Şekil 5.6. Nanokompozitlerin Young modülü değerleri.....	48
Şekil 5.7. Epoksi numunelerin tekrarlanabilirliğine dair değerler.....	50
Şekil 5.8. Saf ve nanopirtikül ilaveli epoksi numunelerin hazar yüzeyleri	52
Şekil 5.9. Tokluk arttırma mekanizmaları	53
Şekil 5.10. Çekme deneyi	54
Şekil 5.11. Nano SiO ₂ takviyeli ve saf epoksili tabakalı kompozitlerin çekme gerilmesi–birim şekil değiştirme grafiği.....	55
Şekil 5.12. KNT takviyeli ve saf epoksili tabakalı kompozitlerin çekme gerilmesi–birim şekil değiştirme grafiği	55
Şekil 5.13. Nano hibrit takviyeli ve saf epoksili tabakalı kompozitlerin çekme gerilmesi–birim şekil değiştirme grafiği.....	56
Şekil 5.14. Tabakalı kompozitlerin çekme mukavemeti değerleri	57
Şekil 5.15. Tabakalı kompozitlerin çekme uzaması değerleri.....	57
Şekil 5.16. Tabakalı kompozitlerin tokluk değerleri	58

Şekil 5.17. Tabakalı kompozitlerin Young modülü değerleri	58
Şekil 5.18. Nanopartiküllerin ayrı ayrı ve birlikte matris içerisinde şematik olarak gösterimi	60
Şekil 5.19. Tabakalı kompozitlerin çekme deneyi değerlerinin tekrarlanabilirliği	61
Şekil 5.20. Saf cam (SC_K) test numunesinin çekme testi sonrası hasar görüntüleri....	63
Şekil 5.21. Nano takviyeli cam (NSC_K) test numunesinin çekme testi sonrası hasar görüntüleri.....	64
Şekil 5.22. Saf karbon kompozit (SK_K) test numunesinin çekme testi sonrası hasar görüntüleri.....	65
Şekil 5.23. Nano takviyeli karbon kompozit (NKK_K) test numunesinin çekme testi sonrası hasar görüntüleri.....	66
Şekil 5.24. Saf hibrit kompozit (SH_K) test numunesinin çekme testi sonrası hasar görüntüleri.....	67
Şekil 5.25. Nano takviyeli hibrit kompozit (NH_K) test numunesinin çekme testi sonrası hasar görüntüleri.....	68
Şekil 5.26. Üç nokta eğme deneyi	69
Şekil 5.27. Nano SiO ₂ takviyeli ve saf epoksili tabakalı kompozitlerin gerilme-birim şekil değiştirme grafiği	70
Şekil 5.28. KNT takviyeli ve saf epoksili tabakalı kompozitlerin gerilme-birim şekil değiştirme grafiği	70
Şekil 5.29. Nano hibrit takviyeli ve saf epoksili (karbon/cam) tabakalı kompozitlerin gerilme-birim şekil değiştirme grafiği	71
Şekil 5.30. Nano hibrit takviyeli ve saf epoksili (cam/karbon) tabakalı kompozitlerin gerilme-birim şekil değiştirme grafiği	71
Şekil 5.31. Tabakalı kompozitlerin eğme mukavemeti değerleri	72
Şekil 5.32. Tabakalı kompozitlerin eğme uzaması değerleri.....	72
Şekil 5.33. Tabakalı kompozitlerin eğme deneyi değerlerinin tekrarlanabilirliği	73
Şekil 5.34. Saf, nano takviyeli ve hibrit test numunelerinin basma testi sonrası genel hasar görüntüleri	76
Şekil 5.35. Saf (SC_K) ve nano takviyeli (NC_K) cam test numunelerinin basma testi sonrası hasar görüntüleri.....	79
Şekil 5.36. Saf (SK_K) ve nano takviyeli (NKK_K) karbon test numunelerinin basma testi sonrası hasar görüntüleri	80
Şekil 5.37. Saf (SH(C/K)_K) ve nano takviyeli (NH(C/K)_K) hibrit test numunelerinin basma testi sonrası hasar görüntüleri	82
Şekil 5.38. Saf (SH(K/C)_K) ve nano takviyeli (NH(K/C)_K) hibrit test numunelerinin basma testi sonrası hasar görüntüleri	84

ÇİZELGELER LİSTESİ

Çizelge 3.1. Yaygın kullanılan cam elyafların mekanik özellikleri	23
Çizelge 4.1. Epoksi reçineye ait mekanik özellikler	36
Çizelge 4.2. ÇCKNT'nin teknik özellikleri.....	37
Çizelge 4.3. SiO ₂ 'nin teknik özellikleri.....	37
Çizelge 4.4. Deneyde kullanılan kompozit numunelerin kodlaması	43
Çizelge 5.1. Saf epoksi ve SiO ₂ nanopartikül ilaveli mumunelerin mekanik özellikleri ve saf epoksiye göre değişim oranları.....	51
Çizelge 5.2. Saf epoksi ve KNT ilaveli mumunelerin mekanik özellikleri ve saf epoksiye göre değişim oranları	51
Çizelge 5.3. Nano SiO ₂ ve KNT takviyeli tabakalı kompozitlerin mekanik özelliklerinin saf epoksili tabakalı kompozitlere göre değişimi	62
Çizelge 5.4. Nano SiO ₂ ve KNT takviyeli tabakalı kompozitlerin mekanik özelliklerinin saf epoksili tabakalı kompozitlere göre değişimi	74

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

SC_K	: Saf epoksi_ cam fiber takviyeli kompozit
SK_K	: Saf epoksi_ karbon fiber takviyeli kompozit
SH_K	: Saf epoksi_ hibrit fiber takviyeli kompozit
SH(K/C)_K	: Saf epoksi_ hibrit (KARBON/CAM) fiber takviyeli kompozit
SH(C/K)_K	: Saf epoksi_ hibrit (CAM/KARBON) fiber takviyeli kompozit
NSC_K	: % 1.5 SiO ₂ epoksi_ cam fiber takviyeli kompozit
NKK_K	: % 1 KNT epoksi_ karbon fiber takviyeli kompozit
NH_K	: Nano (SiO ₂ +KNT) epoksi_ hibrit fiber takviyeli kompozit
NH(K/C)_K	: Nano (SiO ₂ +KNT) epoksi_ hibrit (KARBON/CAM) fiber takviyeli Kompozit
NH(K/C)_K	: Nano (SiO ₂ +KNT) epoksi_ hibrit (CAM/KARBON) fiber takviyeli kompozit

Kısaltmalar

KNT:	Karbon Nanotüp
SiO ₂ :	Silisyum Dioksit
RTM:	Reçine Transfer Metodu
PMK:	Polimer Matrisli Kompozitler
ÇCKNT:	Çok Cidarlı Karbon Nanotüp
TCKNT:	Tek Cidarlı Karbon Nanotüp

1. GİRİŞ

Kompozit malzemelerin; çeşitliliği, üretiminin kolaylığı, estetik görünüm sağlamaları ve en önemlisi de nano yapılarla olan uyumları ile bu malzemeler araştırmacıların ilgi odağı haline gelmiştir. Bu durum, nano malzeme içerikli kompozitlerin ortaya çıkmasını hızlandırmıştır. Nano kelimesi, Yunanca “*nanos*” kelimesinden gelir ve “*cüce veya küçük*” kelimesini ifade eder (Wang ve ark., 2007). Günümüzde nano terimi, teknik bir ölçü birimi olarak kullanılmaktadır. Ayrıca, bir nanometrenin değeri; metrenin milyarda biri ölçüsünde uzunluğu ifade eder (10^{-9} m).

Kompozit malzemelerden özellikle polimer matrisliler hafifliğin yanı sıra yüksek dayanıma sahip olmalarına rağmen kırılğan bir yapıya sahiptir. Elyaf takviyeli kompozitlerde matrisin mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi bu bakımdan önemlidir. Bu bağlamda matrisin mekanik özelliklerini iyileştirmek için nanoteknolojinin de gelişmesi ile 1–100 nm çapında nanopartiküllerle nanokompozitler üretilmektedir (Kalaitzidou ve ark., 2007). Literatürde nanopartikül ilavesi ile mekanik, termal ve diğer özelliklerde de değişimler elde edilmiştir (Chen ve ark., 2008; Jalali ve ark., 2011; Omrani ve ark., 2009). Fakat bu iyileştirmenin oluşması matrisle uyumunun iyi sağlanmasına, yani karışımının iyi oluşturulmasıyla gerçekleşmektedir. Nanopartiküllerin dağılımının iyileştirilmesi için de çalışmalar mevcuttur (Gojnyve ark., 2005).

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

Termoplastik kompozit malzemelerin temel dezavantajlarından birisi düşük erime sıcaklığına sahip olmalarıdır. Zincirleri içinde birincil (direkt bağlı) kovalent, zincirler arası ise ikincil (etkileşerek) Van Der Waals bağlarına sahiptirler. Termoplastikler, sekonder bağlar ve zincirler tarafından birbirine tutturulmuş uzun hidrokarbon moleküllerinden oluşurlar ve ikincil bağların (Van Der Waals), birincil

(kovalent) bağlardan daha zayıf olurlar, dolayısı ile bir termoplastiğin sıcaklığını arttırarak kolayca eritilebilirler (Sheikh-Ahmad ve ark., 2009). Termoplastik malzemeler hafiftirler ve geri dönüştürülebilirler. Termoset malzemeler ise geri dönüştürülemezler. Termoset monomerler, genel olarak düşük viskozite sergiler bu durum, son kullanıcının, termosetin performansını optimize eden, takviye edici malzemeleri ve katkı maddeleri kullanmasını kolaylaştırır. Termoset matris, cam elyaf kumaşı iyi ıslatma özelliğine sahiptir ve matris malzemesi olarak epoksi matris çoğunlukla tercih edilir. Ayrıca, cam elyaf dokuma türüne göre mekanik özellikler değişiklik gösterir. Örme elyaf kumaşların kullanımı hem daha kolaydır hem de daha ucuz şekilde üretilebilen yüksek kaliteli kompozitler sebebiyle büyük oranda artmıştır.

İnsan saç teli çapının yaklaşık olarak 100.000 nm olduğu düşünüldüğünde, nano boyuttan söz ederken ne kadar küçük bir ölçekten söz edildiği rahatça anlaşılabilir. Karbon nanotüpler (KNT), nano ölçekte yapılardır. Küçük yapıli bünyelerinde birçok mükemmel özelliği barındırırlar. Yapılmış birçok çalışmada, KNT eklentisinin malzemenin mukavemetini arttırdığını gözlenmiştir. Xie ve ark., (2000) çalışmalarında, KNT'lerin fiber kompozit sisteme entegrasyonunun fiber matris yük transferini arttırdığını gözlemlemişlerdir (Xie ve ark., 2000).

Ayrıca; kompozit interfazın, bir kompozit malzemenin mekanik özelliklerini kontrol ettiği iyi bilinmektedir. Karbon formu olan KNT'ler, yüksek gerilme mukavemeti, Young modülü, yüksek termal iletkenlik ve yüksek akım yoğunluğu gibi üstün mekanik ve fiziksel özelliklere sahip, benzersiz nanoyapılı malzemelerdir (Mintmire, 1995; Jonathan, 2006; Treacy, 1996; Yu, 2000). Bu üstün özellikler, polimer malzemelerin termal iletimini, elektriksel, mekanik özelliklerini yükseltmek amacıyla polimer kompozit sistemlerde dolgu maddesi olarak KNT'lerin kullanılmasına ilgi çekmektedir (Frank ve ark., 1998).

Bu çalışmada nanopartikül ilavesinin polimer matrisli cam ve karbon elyaf takviyeli kompozitin mekanik özelliklerine etkisini tespit etmek amaçlanmıştır. Matris olarak epoksi reçine, nanopartikül olarak KNT ve SiO₂ elyaf takviyesi olarak cam ve karbon elyaf kumaşlar kullanılmıştır.

Çalışmanın ilk aşamasında epoksi matris için uygun nanopartikül oran değerinin bulunması amacıyla ağırlıkça farklı oranlarda (ağırlıkça %0.5, 1.0, 1.5 ve 2) KNT ve yine aynı oranlarda SiO₂ nanopartikül ilaveli kompozitler ASTM D638 çekme testi standardına uygun olarak üretilmiş ve mekanik özellikleri araştırılmıştır. KNT ve SiO₂ nanopartiküllerinin kırılma mekanizmasındaki etkileri de araştırılmış, hasar

yüzeylerinin optik mikroskop görüntüleri incelenmiştir. İkinci aşamada epoksi matris için belirlenen uygun nanopartikül ilave oran değeri ile KNT ve SiO₂ nanopartikül ilaveli cam ve karbon elyaf takviyeli tabakalı kompozitler, vakum torbalama yöntemiyle plaka şeklinde üretilmiştir. Bu plakalardan numuneler çekme testi için ASTM D3039, üç nokta eğme testi için ASTM D7264 standardına uygun olarak kesilmiş, üretilen kompozitlerin farklı gerilmeler altındaki mekanik özellikleri araştırılmıştır. Hasar yüzeyleri ise optik mikroskop yardımıyla incelenmiştir.



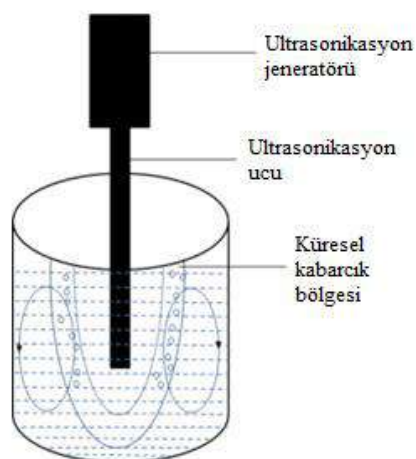
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Üstün mekanik özellikleri, üstün dayanım/ağırlık oranları, kolay şekillendirilebilir olmaları ve işlenebilmeleri gibi özellikleri içerdiğinden kompozit malzemelerin farklı endüstrilerdeki kullanımı her geçen gün yaygınlaşıp artmaktadır. Bunun nedeni geleneksel konstrüksiyon malzemelerine kıyaslandığında kompozitlerin sunduğu; yüksek mukavemet, hafiflik, rijitlik, yüksek enerji sönümleme yetenekleri, kimyasal direnci, korozyon direnci, daha düşük zehirli bileşen içermeleri ve uzun servis ömürleri gibi önemli özellikler barındırmalarıdır (Liang and Hota, 2009). Örneğin havacılık sektörü düşünüldüğünde kompozit malzemelerin kullanım oranı son otuz yılda 10 kat artarak %5 seviyelerinden %50 seviyelerine ulaşmıştır. Bu artışla doğru orantılı olarak yeni ve daha üstün özellikli malzeme ihtiyacı belirmiş buna bağlı olarak kompozitlerin çeşitliliği ve özellikleri de bu oranda artmıştır. Kompozit malzemelerin, iki temel yapı elemanı; matris ve takviye malzemesidir. Teknolojik ihtiyaçlara göre nano veya mikro ölçekli ilave takviye elemanlarının da bu yapıya katılabilmeleri ve kompozitin aşınması, mukavemeti, enerji sönümleme ve iletkenlik gibi özellikler üzerinde önemli gelişmeler sağlamaktadır. Polimer kompozitlerin içerisine ilave edilen nano takviye elemanları organik ve inorganik olmak üzere iki çeşittir. SiO₂, TiO₂ (titanyum dioksit), CaCO₃ (kalsiyum karbonat) gibi nano katkıları inorganik olarak geçerken, muz lifi veya hindistan cevizi, selülozik nano fiberler, siyah karbon ve türevleri gibi pek çok türevleri organik takviye elemanı olarak geçmektedir (Saba ve ark., 2014). Organik fiber ve takviye elemanları, inorganik olanlara kıyasla daha zayıf fiber/matris bağı, düşük aşınma direnci, daha düşük mukavemet sunmaktadır. Bunun nedeni ise organik fiberlerin hem matris ile hem de kendi aralarında daha zayıf adhesyon bağlarına sahip olmalarıdır (Kalia ve ark., 2009). Polimer kompozitlerin mekanik ve fiziksel özelliklerini daha iyi hale getirmek için nano parçacıkların ilave takviye elemanı olarak kullanılması çalışmaları yakın zamanda hız kazanmıştır.

Kompozit malzeme üretiminde destek elemanı olarak pek çok farklı türden malzeme kullanılabilir. Kompozit yapıyı geliştirmeyi amaçlayan çalışmalarda yaygın biçimde kullanılan bu elemanlardan biri de SiO₂'dir. SiO₂ silisyum elementinin oksiti olan, doğada kuvarz olarak bol miktarda bulunan, saf halde %46.5 Si (Silisyum) ve %53.3 O (Oksijen) içeren bir mineraldir (Akçıl ve ark., 2007). Cam elyaf dokuma ve epoksi reçine malzemelerinin yapılarına katılan nano SiO₂'nin kompozitin eğilme

dayanımını ve modülünü geliştirdiği raporlanmıştır (Bilisik ve Yolacan, 2014). Alüminyum matrisli kompozit uygulamasındaysa SiO_2 nano katkısı kompozitin sertliğini arttırmış, çekme dayanımı ve modülünü ise düşürmüştür (Hamouda ve ark., 2007). Epoksi reçineye ilave edilen nano SiO_2 'nin mekanik etkilerinin incelendiği çalışmalardaki genel bulgular reçine içine SiO_2 takviyesinin tokluk, darbe dirençleri ile eğilme ve çekme dayanımı gibi mekanik özellikleri geliştirdiği yönündedir. Fakat bazı çalışmalarda ise yüzde uzama veya süneklik gibi azalan mekanik özelliklere de değinilmiştir (Nayak ve ark., 2014; Chen ve ark., 2008). Çalışmada kullanılan ikinci nano takviye elemanının SiO_2 olarak seçilmesinin nedeni kompozit yapının ana bileşenlerinden biri olan SiO_2 'nin nano boyutta küresel toz biçiminde ve dağınık olarak matris içerisine takviye ederek mekanik özelliklerdeki değişimi incelenmek istenmesidir.

Üretim aşamasında karşılaşılan ve malzeme yapısının özelliklerini doğrudan etkileyen en büyük problem, yapı içerisine takviye edilecek olan nanopartiküllerin reçine içerisinde yeterince homojen dağılmamasıdır. Yapılan pek çok çalışmada bahsedilen bu durumun aşılabilmesi için reçine ve nanopartiküller mekanik karıştırıcının ardından ultrasonik karıştırıcı ile de karıştırılmıştır (Chen ve ark., 2008; Bilisik ve Yolacan, 2014; Zhou ve ark., 2008; Siddiqui ve ark., 2009). Ultrasonik karıştırma mekanizması şematik olarak Şekil 2.1'de gösterilmiştir (Gahaleb ve ark., 2019).



Şekil 2.1. Ultrasonik karıştırma prensibi

Zheng ve ark. (2005) SiO₂ nano dolgu maddesi parçacıklarının mekanik özellikler üzerindeki etkisini incelemek için SiO₂-epoksi ve SiO₂-cam elyafı epoksi nanokompozitleri üretmiş ve mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Takviye elemanı olarak kullandıkları nano SiO₂ partiküller ortalama 15 nm çapında olup matris içerisinde dağılımının iyi sağlanması için modifiye edilmişlerdir. İlk olarak nanopartiküllerin epoksi matrise etkilerini incelemişler ve ağırlıkça farklı (%1, 2, 3, 4 ve 5) takviye oranlarında hazırladıkları kompozitlerde, en iyi artışı %3 nanopartikül ilavesi ile çekme mukavemeti, çekme modülü ve darbe mukavemetinde sırasıyla %115, 13 ve 60 olarak elde etmişlerdir. Tek yönlü cam elyaf takviyeli kompozitlerde ise eğilme dayanımında %69.4 artış, çekme modülü ve mukavemetinde ise sırasıyla %21 ile %23 artış tespit edilmiştir (Zheng ve ark., 2005).

Zhang ve ark. (2006) çalışmalarında sikloalifatik epoksi reçineye nano SiO₂ takviyesi yaparak saf epoksiye göre tokluktaki artışı tespit etmişlerdir. Çalışmalarında %3 nano SiO₂ takviyeli kompozitlerde yük altında çatlak enerjisinde yaklaşık 2 kat artış olduğu gözlemlenmiştir (Zhang ve ark., 2006).

Chen ve ark. (2008), 12-nm küresel nano SiO₂ ilaveli epoksi nano kompozitin mekanik ve termal özelliklerini incelemiştir. Ağırlıkça %10'dan daha az nano-SiO₂ takviyeli kompozitlerin çekme modülünde %25 ve kırılma tokluğunda %30 artış tespit etmişlerdir. Daha fazla nano ilaveli kompozitlerde de çekme modülünde artış olduğunu fakat mukavemet ve kırılma tokluğunda düşüş olduğunu gözlemlemişlerdir (Chen ve ark. 2008).

Yao ve ark. (2008) çalışmalarında SiO₂ ilaveli epoksi nanokompozitlerin makro ve mikroskobik kırılma karakterini deneysel olarak çalışmışlardır. Nanopartiküllerin kırılma davranışı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Sonuç olarak ağırlıkça %3 nano SiO₂ içeren kompozit malzemenin şekil değiştirme direncinin ve kırılma tokluğunun daha yüksek olduğu görülmüştür (Yao ve ark., 2008).

Wei ve ark. (2011) tarafından yapılan çalışmada basalt fiberleri, ağırlıkça %5 SiO₂ nanopartikülleri ile takviye edilmiş ve sonucunda çok filamentli basalt fiberlerin çekme dayanımında %30 ve tabakalar arası kayma mukavemetinde %15 artış olduğunu gözlemlemişlerdir (Wei ve ark., 2011).

Demirci ve ark. (2017) çalışmalarında kompozit malzemelerin reçinelerini SiO_2 nanopartikül ilavesi ile modifiye ederek bazı deneylere tabi tutmuşlardır. Ağırılıkça %4 SiO_2 nanopartikül ilavesi ile halka çekme dayanımı yaklaşık %30 oranında artmış ve kırılma tokluğunun da %43-50 aralığında arttığını ifade etmişlerdir (Demirci ve ark., 2017).

Lal ve ark. (2018) yaptıkları çalışmada kompozit plakaları el yatırma metoduyla üretmişler ve plakaların mekanik özellikleri çekme ve eğilme yüklenme koşullarında değerlendirilmiştir. Kompozit plakalar eşdeğer koşullar altında üretilmişler ve test etmişlerdir. Düz dokuma E-Cam elyaf kumaşı ve matris olarak epoksi LY556 kullanılmıştır. Takviye elemanı olarak 17 nm çapındaki nano- SiO_2 kullanılmıştır. Kompozit karakterizasyonun güvenilirliğini arttırmak için düşük doygunluklar, yüzey kusurları ve boşluklar gibi kusurları önlemek için büyük özen gösterilmiştir. Mekanik özelliklerdeki tutarsızlıklar, değişkenlik katsayısı ile ölçülmektedir. Yapılan bu çalışmada; çekme katsayısı için kopma yükü cinsinden değişkenlik katsayısının 4.45, eğilme deneyi için değişkenlik katsayısı 2.27 sınırlar dahilinde olduğu tahmin edilmektedir (Lal ve ark., 2018).

Kompozit malzemelerin, kullanılan matris ve takviye elemanına göre çok geniş bir özellik yelpazesi bulunduğunu bilen araştırmacılar ve üreticiler, sürekli yeni malzeme üretip geliştirme faaliyetleri yürütmekte olup hem teknolojik hem de ekonomik üstünlük elde etmeye çalışmaktadır. Bu amaç doğrultusunda yapılmakta olan takviye ve güçlendirme çalışmalarının odağında günümüzün en gözde keşfi olan ve çalışma kapsamında da kullanılan KNT'ler bulunmaktadır (Iijima, 1991; Thostenson ve ark., 2003). KNT'ler yüksek termal ve elektriksel iletkenliğe sahip, hafif, dayanıklı, boy/çap oranları büyük olan nano malzemelerdir. Bu özellikleri ise boylarına, çaplarına, yönelmelerine ve duvar özelliklerine bağlıdır (Diez-Pascual, 2011). Çok hafif olmaları, yüksek Young modülüne sahip bilinen en dayanıklı fiber olmaları, KNT'lerin en önemli özelliklerindedir. İç içe giren sarmal yapıları ile tek cidarlı karbon nanotüp (TCKNT), iki cidarlı karbon nanotüp (İCKNT) veya çok cidarlı karbon nanotüp (ÇCKNT) olarak anılmaktadırlar. ÇCKNT'ler $1300 \text{ m}^2/\text{gr}$ gibi çok geniş spesifik yüzey alanı verebilmektedirler (Peigney ve ark., 2001). Deneysel bazı çalışmalar sonucu ÇCKNT'lerin 1-1.8 TPa arasında değişkenlik gösteren Young modülüne ve TEM-esash

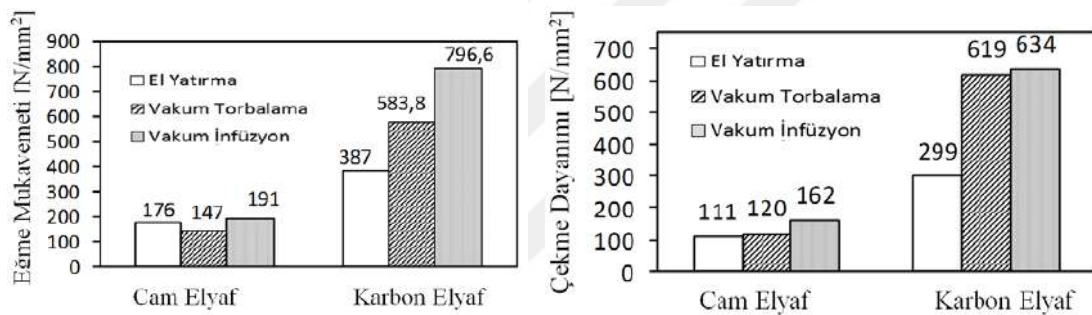
eğme ve çekme deneyleriyle de 0.8-150 GPa arasında çekme mukavemetine sahip olduğu raporlanmıştır (Gogotsi, 2006). Bu malzemelerin yüksek rijitlik ve mukavemetleri ile kendi ağırlıklarının 300 milyon katını taşıyabilme gibi yeteneklerinden ötürü polimer esaslı malzemelerin özelliklerini geliştirmek için büyük potansiyele sahip oldukları anlaşılmıştır (Davis ve ark., 2011). Literatürde KNT'lerin araştırıldığı ilk çalışmalarda saf epoksi reçine içine takviye edilen KNT'nin yapının hasara karşı dayanımını arttırdığını, elektriksel ve termal özelliklerini geliştirdiği tespit edilmiştir (Zhou ve ark., 2008; Nadler ve ark., 2009). Daha sonraki çalışmalarda bu özellik gelişiminin sadece reçine içeren uygulamalarda değil elyaf tabakalı, çekirdek dolgulu ve tabakalı sandviç şeklindeki kompozit yapılarda da olduğu tespit edilmiştir (Liu ve ark., 2012; Silva ve ark., 2014; Li ve ark., 2014).

Bazı çalışmalardaysa, azalan mekanik ve termal özellikler tespit edilmiştir. Örneğin KNT ilavesi ile tokluğun arttığı, gerilme dayanımının ise düştüğü gözlemlenirken (Zhou ve ark., 2008), kompozit malzeme yapısında son ürünün özelliklerinin, ilk olarak nanopartiküllerin homojen dağılmasına ve yükün nanopartikül ile polimer arasında dağıtılacağı polimer-partikül ara yüzey bağlanmasına bağlı olduğu anlaşılmıştır (Siddiqui ve ark., 2009). Yapılan bazı çalışmalar ise KNT ilavesinin malzeme yapısının sadece mekanik özelliklerini değil, aynı zamanda yüzey ve işlenebilirlik özelliklerine de olumlu etkisinin olduğunu ortaya çıkarmıştır (Siddiqui ve ark., 2009; Gao ve ark., 2008). Tabakalı ve sandviç şeklindeki katlı yapılarda tabakalar arası ayrışmaya karşı dayanımın arttığı en çok vurgulanan konular arasında olmuştur (Liu ve ark., 2012; Silva ve ark., 2014). Bu özelliklerinden dolayı çalışma kapsamında partikül takviye malzemesi olarak ÇCKNT seçilmiştir. Özellikle insan yaşamını doğrudan etkileyebilecek, binlerce kritik perçin ve vida yardımıyla montajı yapılan uçak, tekne ve trenlerin gövde panelleri ile vücut implantları ya da protezi gibi medikal ürünlerde kompozitlerin mekanik, termal ve elektriksel özelliklerinin gelişmesine ek olarak işlenebilirlik özelliklerinin de gelişmesi çok büyük öneme sahiptir.

Abdelal ve ark. (2018), Karbon elyaf/KNT takviyeli epoksi kompozitlerin vakum torbalama metoduyla mekanik özelliklerini artırmayı hedeflemişler ve farklı KNT konsantrasyonların da tek yönlü karbon elyaf/epoksi kompozit plakalar, vakum destekli reçine transfer kalıplama (VARTM) yöntemi ile imal edilmiştir. Deneysel sonuçlar, KNT ilave edilmiş epoksi/karbon fiber kompozitin saf epoksi/karbon fiber

kompozit ile karşılaştırıldığında Young modülü'nde %20'lik iyileştirme gösterdiğini tespit etmişlerdir.

Durgun ve ark. (2014), farklı üretim metotlarının karbon ve cam elyaf takviyeli polimer kompozitlerin mekanik özellikleri üzerine etkilerini inceledikleri çalışmalarında el yatırma ile tabakalama, vakum infüzyon ve vakum tornalama metotlarıyla ürettikleri karbon ve cam elyaf polimer kompozitlerin çekme ve üç nokta eğme deneyleri yapılmıştır. Tespit ettikleri sonuçlara göre el yatırma ile tabakalama yöntemi cam elyaf takviyeli kompozitin eğilme deneyleri hariç diğer tüm deney ve malzeme türlerinde en düşük dayanım değerlerini vermiştir. Vakum infüzyon yöntemi ise tüm deney ve malzeme türlerinde en iyi dayanım değerlerini vermiştir. Bulgular Şekil 2.2'de verilmektedir (Durgun ve ark., 2014).



Şekil 2.2. Farklı üretim yöntemlerinin cam ve karbon elyaf takviyeli polimer kompozitlerin mekanik özellikleri üzerindeki etkileri (Durgun ve ark., 2014).

Tüzemen ve ark. (2017), KNT nano kil ve hibrit (KNT+Nano kil) eklenmesiyle civatalı, karbon/epoksi nanokompozitlerin mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi üzerine araştırma yapmışlardır. Nano kil, KNT, hibrit kompozitlerden alınan örneklerde yatak mukavemetinde %5.2, 3.9 ve 0.8 artış sağlamıştır. Aynı zamanda nano kil, KNT hibrit kompozitlerin eklenmesinin çekme mukavemetinde %47.7 ve %57.1 artış olduğunu gözlemlemişlerdir (Tüzemen ve ark., 2017).

Cha ve ark. (2017) fonksiyonelleştirilmiş ve işlem görmemiş farklı ilave oranlarında (ağırlıkça % 0.1-5) ilave ettikleri ÇCKNT ile ürettikleri nanokompozitlerin mekanik özelliklerini deneysel olarak incelemişlerdir. Bulgular sonucunda mekanik özellikler açısından fonksiyonelleştirilmiş KNT ilaveli nanokompozitlerden daha yüksek değerler elde etmişlerdir. Fonksiyonelleştirilmiş %2 KNT ilaveli

nanokompozitlerin çekme modülünde saf epoksiye göre %65 artış elde edilmiştir. Buna karşın süneklikte düşüşler dikkat çekicidir. Fonksiyonelleştirilmemiş KNT takviyeli nanokompozitlerde en yüksek değerler %1 takviyeli numunelerden elde edilmiştir (Cha ve ark., 2017).

Khashaba ve ark. (2014) ağırlıkça farklı ilave oranlarında (%0.25-1) ÇCKNT ilaveli epoksi nanokompozitlerin mekanik özelliklerini araştırmışlardır. Yapmış oldukları çalışma sonucunda, kopma gerilmesi ve çekme modülünde en yüksek artışları saf epoksiye kıyasla sırasıyla %7.5 ve %18.2 artışlarla ağırlıkça % 0.5 ÇCKNT takviyeli nanokompozitlerden elde etmişler ve bu takviye oranından sonra düşüşler görüldüğünü tespit etmişlerdir. Süneklik ise ağırlıkça % 0.25 ÇCKNT takviyeli numuneler hariç diğerleri saf epoksinin altında çıktığı gözlemlenmiştir (Khashaba ve ark., 2014).

Kim ve ark. (2013), çalışmalarında KNT ilaveli, karbon fiber takviyeli epoksi kompozitlerinin kesme ve burulma özellikleri üzerine araştırma yapmışlar ve %0.5 KNT takviyeli kompozitlerin katlar arası kesme dayanımını, saf karbon fiber takviteli plastik (CFRP) kompozitlerine kıyasla %12 oranında artarken, boru örnekleri kullanılarak burulma kesme modülü ve mukavemeti sırasıyla %17 ve %19.5'lik iyileştirme gösterdiğini tespit etmişlerdir (Kim ve ark., 2013).

Gkikas ve ark. (2012) ağırlıkça %0.5 ve %1 ilaveli ÇCKNT epoksi nanokompozitler ile yaptıkları çalışmada kopma gerilmesi değerlerini saf epoksiye oranla % 60'a kadar arttırmışlardır. Buna karşılık, çekme modülü değerleri saf epoksiye kıyasla düşük çıkmıştır (Gkikas ve ark., 2012).

Böger ve ark. (2010), cam elyaf takviyeli epoksi içerisinde nanopartiküllerin ilavesiyle yorulma ömrünün iyileştirilmesi üzerine çalışma yapmışlar ve ağırlıkça %0.3 SiO₂ ve ÇCKNT'ler ile üretilen cam elyaf takviyeli epoksi plakaların yorulma özellikleri, dinamik ve statik yorulma testleri ile değerlendirmişlerdir. Katkılı ÇCKNT matrisi için, elektriksel iletkenlik durumu ölçülmüş ve nanopartiküllerin ilavesiyle, %16'ya kadar olan ara fiber kırılma mukavemetinde artışa neden olduğu sonucuna ulaşılmıştır (Böger ve ark., 2010).

Chou ve ark. (2008), modifiye edilmiş ÇCKNT'ler içeren bir dizi poliamid bazlı nanokompozitlerin özellikleri konusunda çalışma yapmışlardır. Araştırma sonucunda, Young modülünü, gerilme mukavemeti ve uzamasını içeren mekanik özelliklerin, ağırlıkça %0.01-0.5 ÇCKNT içeriği arasında iken arttırdığı, dinamik mekanik analiz (DMA) ölçüleriyle ise, camı geçiş sıcaklığında (Tg) ÇCKNT içeriğinin artmasıyla arttığını açıkça göstermiştir (Chou ve ark., 2008).

Zhihang Fan ve ark. (2008), yaptıkları çalışmada ÇCKNT'li cam elyaf takviyeli epoksi kompozitlerin katlar arası kesme dayanımını iyileştirmeye çalışmışlardır. Bu çalışma sonucunda, katlar arası kesme dayanımının %33'e kadar arttığı sonucuna varılmıştır (Zhihang Fan ve ark., 2008).

Thostenson ve Chou (2002), sıralı dizilmiş ÇCKNT takviyeli kompozitlerin, mekanik karakterizasyonları ve işleme konusunda araştırma yapmışlar ve polistren matris içine %5 oranında ÇCKNT ekleyerek hem sıralı hem de rastgele dizilime sahip nanokompozit malzeme üretmişlerdir. Nanotüplerin takviyesinin, polimer filmlerin akma mukavemetini, çekme modülünü ve nihai dayanımlarını arttırdığını, sıralı nanotüp kompozitler ile Young modülünün gelişimini incelediklerindeyse, rastgele yönlendirilmiş kompozitlere kıyasla hizalı kompozitlerin Young modülüsünün 5 kat daha fazla olduğu sonucuna varılmıştır (Thostenson ve Chou, 2002).

Tarfaoui ve ark. (2016), çalışmalarında KNT katkı maddelerinin tekstil bazlı kompozitlerin elastik davranışları üzerindeki etkisini araştırmıştır. Malzemeler karbon fiber kumaş, Epoksi matris ve KNT'ler olmak üzere üç fazdan oluşmaktadır. KNT'lerin farklı hacim fraksiyonları takviye olarak kullanılmıştır (referans olarak %0.5, 1, 2 ve 4). Açık delik çekme testi, kesme kirişi testi ve düz yönde gerilme testleri gibi bir dizi mekanik test gerçekleştirilmişlerdir. Deneysel sonuçlar, kompozitin mekanik performansında KNT katkı maddelerinin %2'sine kadar bir artış olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, bu değer in ötesinde, malzeme dayanımı önemli bir bozulma gösterdiği gözlemlenmiştir (Tarfaoui ve ark., 2016).

3. KURAMSAL TEMELLER

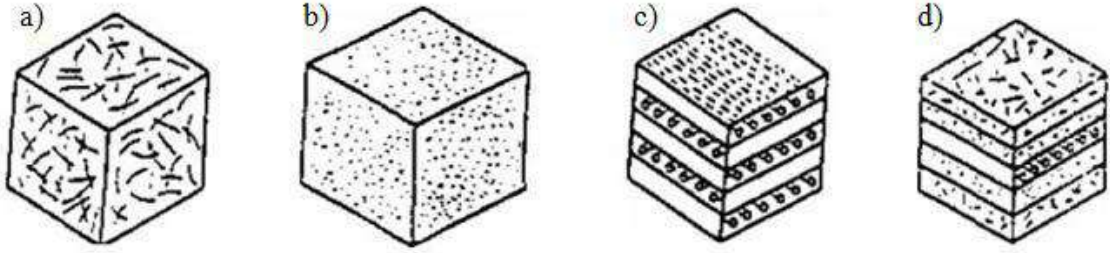
3.1. Kompozit Malzemeler

20. yüzyılın ikinci yarısından itibaren tekniğin hızlı biçimde gelişmesi, beraberinde sanayinin temel girdisi olan malzeme ve malzeme biliminde de gelişmeleri hızlandırmıştır. Fakat yeryüzünde temel malzemelerin sınırlı olması nedeniyle, malzemeler ve bu malzemelerin nitelikleri teknolojinin gelişimine ayak uyduramamıştır. Uzayda kullanılan araçların yapımına geçilen geçen asırda, bilim insanları çağın yenilikleriyle birlikte mevcut malzemelerin niteliklerinden, bilimin gelişmesi paralelinde günün şartlarına ve isteklerine uyacak biçimde gerek ekonomik gerek de teknik açıdan daha uygun malzemeler üretme yolunu seçmişlerdir. Birbiri içinde karışmayan iki veya daha fazla malzemenin bileşimiyle oluşan yeni malzemelere "*kompozit malzeme*" denir. Doğadaki malzemelerin çoğu "kompozit" olarak isimlendirilen bileşik yapıli maddelerden oluşmaktadır. Bu karışımın sahip olduğu özellikler, kendini oluşturan malzemelerin özelliklerinden çok daha üstündür. Bu malzemeler yüksek Young modülü, yüksek mukavemet ve yüksek tokluğa sahiptirler.

Son zamanlarda yüksek mukavemet/ağırlık, rijitlik (katılık)/ağırlık oranlarına sahip olan fiber takviyeli reçine kompozitleri, uzay ve uçak araçları gibi hafifliğin kritik öneme sahip olduğu uygulamalarda önemli kullanım sahaları edinmişlerdir. Düne kadar metalden tahtadan yapılan yatlar, tekneler gibi deniz araçları yerlerini artık polyester - cam elyaftan yapılan benzerlerine bırakıyorlar. Bakım-onarım bakımından çok daha avantajlı olan kompozit malzemedan üretilen tekneler aynı zamanda uzun ömürlü, daha hafif ve süratli olmaları nedeniyle tercih edilmektedirler. İmalat sanayisinde artık birçok parça kompozit malzemedan üretilmektedir (Onat, 2015).

Kompozitler tümleşik malzemeler olduğundan dolayı katı sınırlarla gruplandırılmazlar. Bununla birlikte matris ve takviye malzemesine göre farklı şekillerde sınıflandırılabilir. Matris malzemesine göre yapılan sınıflandırmada Polimer Matrisli Kompozitler (PMK), Seramik Matrisli Kompoziter (SMK) ve Metal Matrisli Kompozitler (MMK) olmak üzere üç ana grupta sınıflandırılırlar. Takviye malzemesi yapısına göre yapılan sınıflandırmaysa Şekil 3.1'de gösterildiği gibi elyaf takviyeli kompozitler, partikül takviyeli kompozitler, tabakalı kompozitler ve karma (hibrit) kompozitler şeklinde ayrılmaktadır (Askeland, 1998). Bazı çalışmalarda üretim

metodu bakımından da bir sınıflandırma yapılmakta olup buna göre açık kalıplama ve kapalı kalıplama şeklinde iki ayrı grup kompozit yapı söz konusudur (Türkmen, 2012).



Şekil 3.1. Kompozitlerin takviye malzemesi yapısına göre sınıflandırılması: a) elyaf takviyeli, b) parçacık takviyeli, c) tabakalı, d) karma (hibrit).

3.1.1. Polimer matrisli kompozitler

Takviye elamanını çevreleyen matris yapısının polimer esaslı bir malzeme olduğu kompozit türüdür. Polimerler, monomer diye isimlendirilen küçük moleküler grupların tekrarlamasıyla elde edilen bileşik yapılardır. Tekrar sayısı 103 ile 106 civarında olabilmektedir (Eskizeybek, 2012). Polimer kompozitlerin matris malzemesi çok çeşitli ve özellikli polimerler olabilirken takviye malzemeleri karbon, cam, aramid, metalik, seramik esaslı malzemeler, pul veya partikül olabilmektedir. Polimer matrisli kompozitler yapısal mühendislik malzemeleri içinde en önemlilerin arasına girmiştir. Bu durum yalnızca yüksek performanslı aramid ve karbon gibi elyafların geliştirilmesinden kaynaklı değil aynı zamanda geliştirilmiş yeni polimer matrislerin sayesinde. Polimerlerin barındırdığı mekanik özellikleri genelde mühendislik uygulamaları için yetersizdir sayılmaktadır. Özellikle mukavemet ve rijitlikleri seramik ve metallere daha düşüktür. Bu sebeple, polimer malzemelerin mekanik özelliklerinin takviye elemanlarıyla iyileştirilmesi hususunda geniş bir alan vardır. Sonuç olarak geliştirilmiş özellikleriyle birlikte ortaya kolay üretilen polimer matrisli kompozitler çıkmıştır. Polimer matrisli kompozitler, metaller ve seramik matrisli kompozitlere kıyasla daha yaygın bulunmaktadır. PMK'ları üretmek için yüksek sıcaklıklar ve basınç gerekmediği için, karmaşık şekle sahip parçaların üretimi de kolay olmaktadır. Üretim aşamasında takviye elemanın bozulmasıyla ilgili sorunlar, polimer kompozitler düşük sıcaklıklarda üretildiğinden dolayı sorun teşkil etmezler. Buna ek olarak, bu tür kompozitlerin üretilmesi için gerekli ekipmanlar daha basittir. Sonuç olarak, polimer

matrisli komozitlerin üretimi ve geliştirilmesi hızlı biçimde gerçekleşmiş ve çoğu yapısal uygulamalar için tercih edilmeye başlanmıştır (Balasubramanian, 2013).

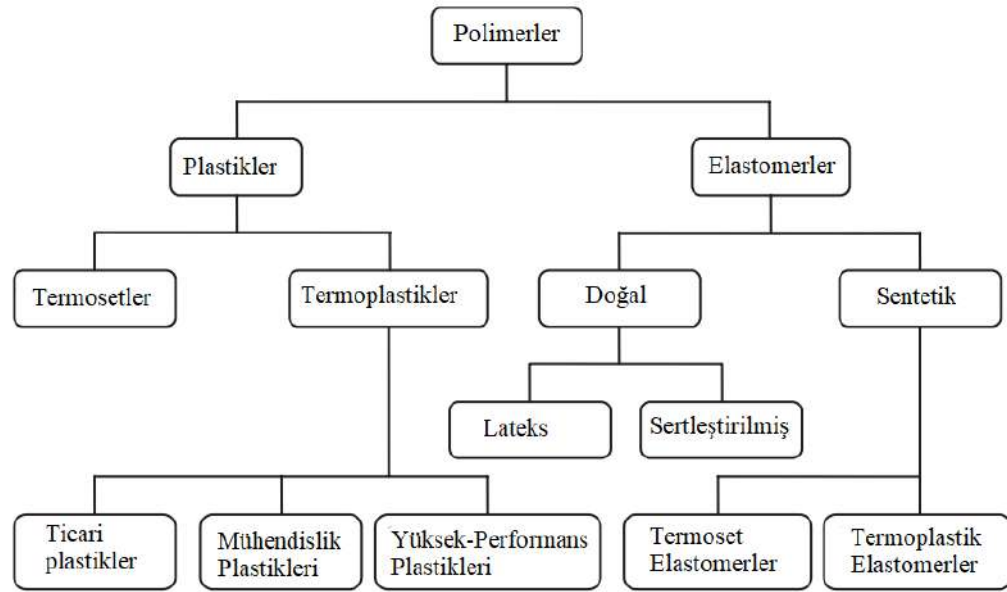
Polimer matrisli kompozitlerin en uygun mukavemet hafiflik ve rijitlik için elyaf kombinasyonlarının yapılabilmesi, yüksek korozyon direnci, geliştirilmiş yorulma ömrü, daha az parça ve bağlantı elemanı kullanılması sonucunda düşük montaj maliyeti gibi birçok avantajı barındırmaktadır. Yüksek mukavemete sahip elyafların (özellikle karbon) özgül mukavemet (mukavemet/yoğunluk) ve özgül modül (modül/yoğunluk) değerleri havacılık ve uzay çalışmalarında kullanılan eşdeğer metalik alaşımlara kıyasla oldukça yüksektir. Buna bağlı olarak iyi derecede ağırlık kazanımı yani hafiflik bunun sonucu olarak performansta gelişim, daha uzun menzil, daha yüksek taşıma kapasitesi ve yakıt tasarrufu olarak geri dönüşüm sağlayabilmektedir. Korozyon direnci ise hava ve deniz araçlarında önemlidir, bu bakımdan da kompozitler tasarruf sağlatabilmektedir. Örneğin karbon elyafların doğrudan metal yüzeye temas ettiği bir durumda, alüminyumda galvanik korozyon meydana gelmektedir, fakat ara yüzeye eklenen elektrik yalıtım tabakası cam elyaflar bu sorunu ortadan kaldırmaktadır. Diğer yandan kompozit malzemelerin eşdeğer metal malzemelere göre yorulma ömrü daha iyidir (Campbell, 2010).

Polimer matrisli kompozitlerin barındırdığı bu avantajlarının yanı sıra dezavantajlarıysa; sıklıkla yüksek üretim ve montaj maliyeti, yüksek ham madde maliyeti, sıcaklık ve nemin olumsuz etkileri, matrisin ana yükleri taşıdığı kısımlarda düzlem dışı yüklenme durumunda düşük mukavemet (bu nedenden ötürü yüklenme yolunun karmaşık olduğu durumlarda kullanılmamalıdır), delaminasyon veya tabaka ayrılmalarına duyarlılık, darbe hasarına ve metallere kıyasla tamirlerinin çok daha zor olması sıralanabilir. Polimer malzemenin camsı geçiş sıcaklığı (Tg); camın rijit, camsı katı bir yapıdan daha yumuşak bir yapıya dönüştüğü sıcaklık olarak tanımlanmaktadır. Bu durumda polimer yapı hala bozulmamıştır fakat çapraz bağlar artık kilitli pozisyonda değildir. Bu sebeple Tg bir kompozit veya yapıştırıcı için en üst çalışma sıcaklığı olarak tanımlayabiliriz. Bu sıcaklığın üstündeki sıcaklıklarda malzeme ciddi anlamda düşük mekanik özellikler ortaya koyacaktır. Termoset polimerler Tg yi aşırı şekilde düşüren nemi daha çok absorbe ettiklerinden dolayı gerçek kullanım sıcaklıkları doymuş ya da ıslak Tg değerinden 30 °C daha düşük olmalıdır. Bu yapıya giren nem, matris tabanlı mekanik özellikleri düşürmektedir ve buna bağlı olarak matrisin kabarmasına sebep olmaktadır. Bu kabarmalar yüksek sıcaklıktaki küremelerde malzemenin yapısında kitli olan termal gerilmeleri ortaya çıkartır. Bu gerilmeler yüksek olabilir ve köşelerinden

sabitlenmiş büyük paneller kabarma nedeniyle ortaya çıkan gerilmeler ile bükülebilir. Soğuk tavlama çevrimi esnasında bu nem kabarmaları matrisi çatlatabilir ve ani sıcaklık yükselmelerinde buhara dönüşebilir. İç buhar basıncı kompozitin yatay çekme (kalınlık boyunca) dayanımını aştığı anda tabakada delaminasyon olacaktır (Campbell, 2010).

Polimer matrisli kompozitlerin uzay, havacılık, otomotiv ve inşaat endüstrilerinden spor aletlerine kadar çok geniş alanlarda kullanımı mevcuttur. Cam elyaf takviyeli kompozit malzemelerin kullanım alanı oldukça geniştir. Kimya endüstrisinde reaksiyon kapları (basıncılı – basıncısız), tanklar, atık madde ve proses boruları gibi malzemeler çoğunlukla cam elyaf takviyeli polyester reçine kompozitlerden üretilmektedir. Cam elyaflı kompozitlerden yapılmış yürüyüş yolları ve deniz üzerindeki birçok yapılar pultrüzyon tekniğiyle imal edilmiştir. Aramid ve cam elyaf takviyeli PMK'ler, sivil havacılıkta kullanılan uçaklarının zeminlerinde ve depolarında kullanılmaktadır. Ayrıca; uçağın kaplamalarında, kapılarında ve burun kısmında polimer matrisli kompozit malzemeler kullanılmaktadır. Küçük uçakların ve helikopterlerin bazı önemli parçalarıysa aramid elyaf takviyeli kompozitlerden üretilmektedir. Aramid elyaflar birçok uygulamada cam elyafların yerini alabilirler fakat maliyeti daha yüksektir. Özel botlar ve yarış botları gibi performansın maliyetten daha çok öneme sahip olduğu yerlerde cam elyaf yerine aramid elyaf kullanılabilir. Bagetler (davul sopası) pultrüzyonla üretilmiş aramid dolgu (core) barındıran enjeksiyon-dökümle termoplastik kaplı olarak imal edilmektedir. Bu bagetler ahşap olanlara kıyasla daha hafif, daha az yamulan, daha uzun ömürlü ve daha dayanıklıdır. Askeri alanda polimer matrisli kompozit malzemelerin kullanımı miğferlerden roket kılıflarına varana kadar yayılmaktadır. Kayma, basma ya da enine çekme yüklemeleri içeren bileşenlerde aramid elyafların kullanılması tavsiye edilir, bu tür bileşenlerde aramid elyafların yanında başka bir elyafta kullanılması önerilmektedir. Polimer kompozitler yaygınlıkla askeri ve ticari helikopterlerde aracı hafifletme amaçlı kullanılmaktadırlar (Balasubramanian, 2013).

Organik polimerler geniş olarak elastomerler ve plastikler olarak sınıflandırılabilirler. Plastik malzemeler genel olarak hasardan önce yüksek miktarda plastik deformasyona uğrarken, elastomerler büyük miktarda elastik deformasyona uğrarlar. Şekil 3.2'de polimerlerin sınıflandırılması gösterilmiştir (Balasubramanian, 2013)

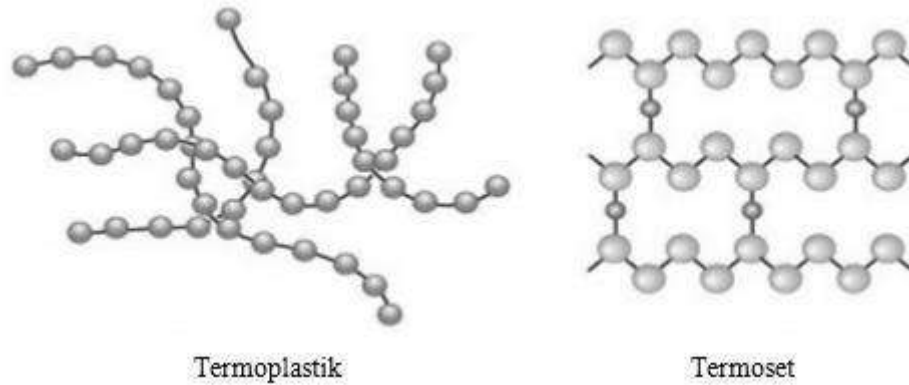


Şekil 3.2. Polimerlerin sınıflandırılması (Balasubramanian, 2013).

3.1.1.1. Polimer kompozit matris malzemeleri

Polimer matrisli kompozitler (PMK'ler) yapısal mühendislik malzemeleri içinde en önemlilerin arasına girmiştir. Bu durum yalnızca yüksek performanslı karbon ve aramid gibi elyafların geliştirilmesinden dolayı değil aynı zamanda geliştirilmiş yeni polimer matrislerin sayesinde. Polimerlerin mekanik özellikleri genel anlamda mühendislik uygulamaları için yetersiz sayılmaktadır. Özellikle mukavemet ve rijitlikleri seramik ve metallerden daha düşüktür. Bu sebeple, polimer malzemelerin mekanik özelliklerinin takviye elemanlarıyla iyileştirilmesi hususunda çok geniş bir alan vardır. Sonuç olarak ortaya geliştirilmiş özelliklerinin yanı sıra kolay üretilen polimer matrisli kompozitler çıkmıştır. PMK'ler, seramik ve metal matrisli kompozitlere oranla daha yaygın olarak bulunmaktadır. Polimer matrisli kompozitleri üretmek için yüksek basınç ve sıcaklıklar gerekmediğinden, karmaşık şekildeki parçaların üretimi de daha kolay olmaktadır. Üretim aşamasında takviye elemanın bozulmasıyla ilgili sorunlar, polimer kompozitler düşük sıcaklıklarda üretildiğinden dolayı sorun teşkil etmezler. Buna ek olarak, bu tür kompozitlerin üretimi için gerekli olan ekipmanlar daha basittir. Sonuç olarak, polimer matrisli kompozitlerin üretimi ve geliştirilmesi hızlı biçimde gerçekleşmiş ve çoğu yapısal uygulamalar için daha çok tercih edilmeye başlanmıştır (Balasubramanian, 2013).

Kompoziti oluşturan takviye ve matris malzemelerinin türlerinin seçimi, üretim yöntemi, kompozitin kullanım amacıyla kompozitten istenen dayanım ve yapısal özellikler ile doğrudan bağlantılıdır. Kompozitin istenen başarıyı göstermesi matris ve takviye elemanının uygun seçimine bağlıdır. Matrisin başlıca görevleri; takviye malzemesini korozyon, oksidasyon gibi dış etkilerden izole etmek, uygulanan kuvvetleri takviye malzemesine iletmek, dağıtmak ve doğrudan gelen yüklerden korumaktır. Bu sebeple matris malzemesi seçiminde; malzemenin korozyon, nem, uzama, darbe ve kopma gibi mekanik özellikleri oldukça önemlidir. Matris malzemelerinin çoğu sıvı halde bulunduğundan dolayı viskozitesi de göz ardı edilmemelidir. Matris malzemesinin kürlenme (fiziksel ve kimyasal dönüşüm) zamanı, kürlenme ortamı ve kürlenme sıcaklığı matris seçiminde rol oynayan önemli etkenlerdir. Polimer matris olarak kullanılan malzemeler Termoset ve Termoplastik olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Şekil 3.3'de moleküler yapıları şematik olarak gösterilmiştir (Becenen, 2008).



Şekil 3.3. Termoplastik ve Termoselerin moleküler yapıları.

3.1.1.1.1. Termoplastik malzemeleri

Termoplastikler, Van der Waals bağlarıyla birbirlerine bağlı uzun hidrokarbon moleküllerinden oluşurlar. Bağ kuvvetinin zayıflığı nedeniyle termoplastikler ısıtıldıkları zaman önce yumuşarlar daha sonra erirler. Soğutulduklarındaysa tekrar katılaşır (Eskizeybek, 2012). Termoplastikler eritildiklerinde ya da katılaştıklarında kimyasal özelliklerinde bir değişiklik olmaz, yalnızca fiziksel bir değişiklik olmaktadır. Termoplastik malzemeler tekrar kullanımı olan geri dönüşümlü malzemelerdir. Termoplastik matrislerin şekillendirme operasyonları yumuşatılma süreleriyle bağlantılı olarak çok kısa sürelidir. Örnek olarak enjeksiyon kalıplama prosesi birkaç saniyeyle bir

kaç dakika arasında tamamlanmaktadır (Türkmen, 2012). Bu sebepten seri üretime ve yüksek sayılı parça imalatına yatkındırlar. Ancak şekillendirilmeleri için gerekli sıcaklık ve basıncın üretilip uygulanabilmesi, nitelikli teknik altyapı ve donanımına sahip olmak gerekmektedir. Üretim ekipmanları maliyetli ve komplekstir. Yapısal özelliklerinin iyileştirilebilmesi amacıyla bazı durumlarda birden çok üretim operasyonundan geçmeleri gerekli olabilmektedir (Yöneş, 2007).

Termoplastik matris grubunu oluşturan ve en çok kullanılan polimerler şunlardır: Akronitril Bütadien Stiren (ABS), Akrilik, Poli Tetra Fluor Etilen (PTFE-Teflon), Poli Etilen Türevleri (PE), Poly Amid Türevleri (PA), Poli Vinil Klorür (PVC), (Poli Propilen (PP), (Yıldızhan, 2008).

Termoplastik reçinelerin birçok üstün özellikleri olmasına rağmen yüksek ısı ve basınç altında işlem görme, yüksek viskoziteli olmaları sonucu amorf olan bazı termoplastiklerin çözücülere karşı hassas olması, elyaf takviyeli kompozitlerde üretim zorluğu gibi nedenlerden dolayı termosetler kadar kompozit üretiminde kullanılmamaktadırlar.

3.1.1.1.2. Termoset malzemeleri

Termoset plastikler, ısıtılarak ve istenenilen şekle getirilerek yumuşatılabilen, soğutmadan sonraysa sertlik kazandıran balmumu benzeri bileşiklerdir (Nicholas ve Cheremisinoff, 1995). Termoset malzemeler, termoplastiklere benzer olarak ısıtıldıklarında yapılarında kimyasal değişimler meydana gelir. Bu sebepten tekrar eski şekillerini alamazlar. Genel olarak, kompozit malzeme üretiminde en çok kullanılan matris malzemesidir. Termosetlerin yapışma özelliğinin iyi olması, ayrıca kimyasallara karşı dirençli olması sebebiyle kullanım alanını arttırmaktadır. Termoset malzemeler, kovalent bağlar ile bağlanmıştır. Bu fark; termoplastiklerle termosetleri birbirinden ayıran en önemli farklılıktır. Bu sebepten termosetler, termoplastiklere kıyasla daha rijit ve düşük sünek davranış sergilerler (Sheikh-Ahmad, 2009).

Üretim yöntemi ve mol kütesine bağlı olarak epoksi reçineler, katı veya sıvı polimer halinde elde edilirler. Polimerik kompozit üretiminde genel olarak epoksi reçineler tercih edilir. Epoksi reçineler yüksek yapıştırma gücüne sahip plastik malzemelerdir ve termoset polimer sınıfında yer alırlar. Matris fazı olarak çokca tercih edilirler. Epoksi reçineler, düşük viskoziteli reçinelerdir. Çoğunlukla basınç altında ve oda sıcaklığında kalıplanabilir ve yan ürün oluşumu sağlamazlar. Düşük basınçlarda

kullanılabilen reçineler, yaygın olarak cam elyaf takviyeli plastik (FRP) kalıplama için tercih edilirler (Nicholas ve Cheremisinoff, 1995). Epoksi matris, gösterdiği yüksek adezyon geniş sıcaklık aralıklarında çabuk sertleşebilme, uygulandıklarından kısa süre sonra kullanılabilmesi gibi birçok avantajlara sahiptirler. Diğer reçinelere kıyasla çoğu kimyasala karşı dayanıklıdırlar. Neme ve korozyona karşı dayanıklıdırlar, yüksek mekanik özelliklere sahiptirler. Epoksi reçinelerin kürlenmesinde büzülme eğilimleri azdır, bundan ötürü iç gerilme oluşumu minimize edilir.

3.1.1.2. Polimer kompozit takviye malzemeleri

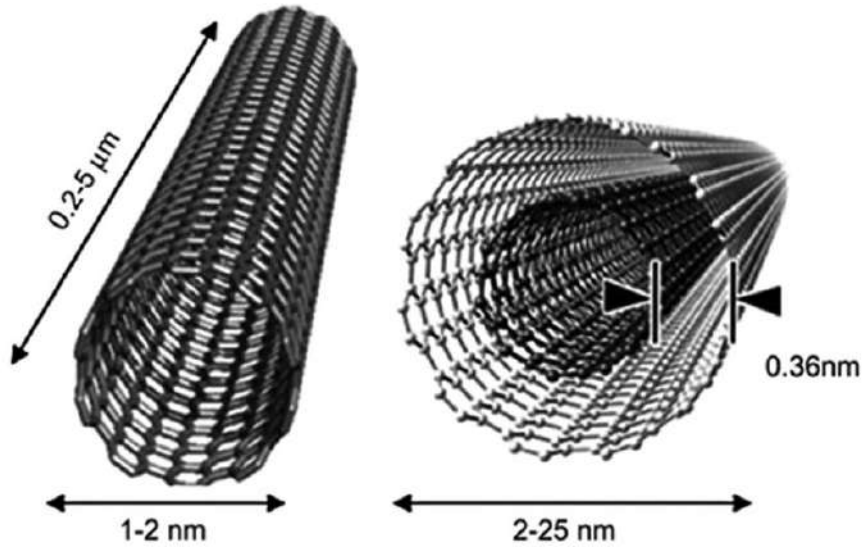
Polimer kompozit malzemelerde kullanılan takviye elemanlarının genel sınıflandırması; sürekli elyaflar, süreksiz elyaflar ve partiküller olmak üzere üç başlık altında yapılmaktadır. Süreksiz elyafların sürekli elyafların kırılmaları veya parçalanmaları halinde türetildiği düşünüldüğünde takviye elemanlarının esasının partiküller ve elyaflardan oluşmuş olduğu anlaşılmaktadır.

Partikül takviyeli kompozitlerin üretimi, elyaf takviyeli olanlara kıyasla daha kolay olmakla birlikte dayanım bakımından daha zayıftırlar. Partiküllerin kompozit yapısına katılmalarında en büyük kısıtlama partiküllerin boyutlarıyla alakalı olarak homojen dağıtılmalarının ve matris tarafından ıslatılmalarının zor olmasıdır. Partiküller kompozitin içerisinde dengeli ve homojen dağıtıldığı sürece yapının izotropik özelliği artmaktadır. Takviye ve matris elemanı ara yüzeyindeki bağlanma malzeme sistemine asıl mukavemeti veren özelliktir. Kompozit sisteme katılan partiküller dolgu malzemesi olarak da isimlendirilebilmektedirler.

Yapılan uygulamalarda takviye elemanı olarak birçok elyaf çeşidi kullanılmaktadır. Elyaflar uzunluklarının uzun, kısa veya sürekli olmasına göre rijitlik ve mukavemetlerinin düşük, orta ve yüksek olmasına göreyse çok yüksek modüllerine göre veya inorganik ya da organik olan kimyasal bileşenlerine göre sınıflandırılabilirler. İnorganik elyaflardan en çok bilinenleri karbon, cam, boron, aramid, seramik, mineral ve metaliktirler. Elyaf seçimi maliyet, mekanik ve çevresel özelliklerin uygulamadaki etkinliğine göre yapılabilir (Barbero, 2010).

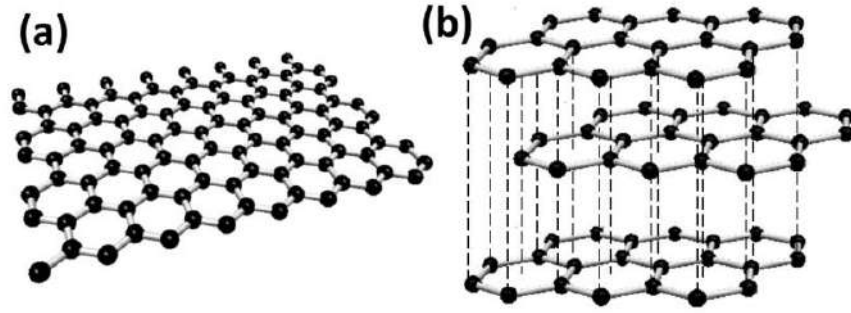
3.1.1.2.1. Karbon nanotüp

KNT'ler ilk olarak 1991 yılında ortaya çıkmıştır. Grafen sistemi olarak tanımladığımız tabakalı yapının bir silindir şeklinde elde edilmesinden ortaya çıkmıştır. Hafiflik, yüksek Young modülü ve nanometre düzeyinde bir yapıya sahip olmasıyla dikkati üzerine çekmiştir. Örnekleme gerekirse 50 bin tane KNT'nin bir araya gelmesi sadece bir saç teli kalınlığına tekabül etmektedir. KNT'lerin bu eşsiz özelliklerinden dolayı kevlerden 30 kat, çelikten 117 kat daha dayanıklı oldukları ortaya çıkmıştır. Aynı zamanda esneklikleri üzerine yapılan deneylerde kopma uzamasının 2 kat üzerine çıkabildiği tespit edilmiştir. Kimyasal yapıları saf karbon atomlarından oluşmasından dolayı elmadan bile daha dayanıklı bir malzemedir. Tek ve çok cidarlı KNT'lerin yapısı Şekil 3.4'de verilmiştir.



Şekil 3.4. Tek cidarlı ve çok cidarlı karbon nanotüp yapısı (Clair, 2016)

KNT'ler, yapısal olarak silindirik biçime getirilmiş grafen levhalardan oluşan görünümü bal peteğine benzeyen fulleren denilen yapıdan oluşurlar. Başka bir deyişle; hegzagonal yapıdaki karbon atomlarından oluşurlar. Grafen, grafit düzlemlerinin bir araya gelmesiyle oluşurlar. Ayrıca, grafit tabakalarının arasında Van der Waals bağları bulunur. Nanoteknoloji biliminin de yakından ilgilendiği KNT'ler küçük yapılarına rağmen, çok yüksek mekanik özellikleri, elektriksel özellikleri, termal kararlılıkları aynı zamanda hafif olmaları sebebiyle çok fazla tercih edilirler. Şekil 3.5'de grafen ve grafit yapıları gösterilmektedir.



Şekil 3.5. a) Grafen yapısı b) Grafit yapısı (Kuchibhatla ve ark, 2007)

TCKNT'lerin istisnai mekanik özellikleri, bu nanopartiküllerin ilave edildiği kompozitlerle alakalı yoğun çalışmalara neden olmuştur. TCKNT'ler tek bir grafen levhanın sarılmasıyla elde edilirler. Uzunluk ve çap oranları, ÇCKNT'lere kıyasla daha düşüktür. Ayrıca, ÇCKNT'nin tek bir tabakasının ölçülen spesifik gerilme dayanımı çelikten 100 kat daha yüksek olabilir ve grafen tabakası düşük gerilimde elmas kadar sert bir yapıya sahiptir (Ruoff, 2003). Nano takviye veya dolgu olarak ÇCKNT'lerin kullanımı, teoride öngörülen mükemmel mekanik özellikleri sebebiyle yakın zamanda artmıştır (Montazeri, 2010).

3.1.1.2.2. Nano SiO₂

Silika olarak bilinen SiO₂ sentetik amorf silika veya doğal mineral olarak kullanılabilir. En saf SiO₂ kristal halinde kuartzdır. SiO₂ diğer metal oksitleriyle birlikte de bulunabilmektedir. Saf olmayan SiO₂ ise kaya, kum ve feldspatlar halinde bulunur. SiO₂ nin ısı iletkenliği çok yüksektir fakat ısı genleşme katsayısı düşüktür. Isıya ve kimyasal maddelere karşı çok dirençlidir. Yoğunluğu 2.65-2.70 g/cm³ olup, sertliği Mohs skalasına göre 7.0'dır. Bu sebeple aşınmaya karşı çok dayanıklıdır. SiO₂ çok aşındırıcı dolgu malzemesi olduğu için işlenebilmesi çok zordur. Bu nedenden dolayı işlenebilmeleri için elmas kesme aygıtları kullanılmalıdır. Daha önceden SiO₂ nanopartiküllerinin kompozit malzemeler üzerine yapılan çalışmalar irdelendiğinde darbe ve gerilme mukavemetinde artışlar tespit edilmiştir. Kompozit malzeme için gereksinim duyulan ana malzemeler sınırlı olduğundan dolayı SiO₂ gibi nanopartiküller yapıdaki ana malzemelerle aynı özellikleri sağlarken diğer yandan maliyeti de düşürmeyi amaçlamaktadır. Bu malzemelerden sıklıkla kullanılmakta olan SiO₂

malzemenin termal, mekanik ve elektriksel özelliklerinde iyileşmeye neden olmaktadır. Reçineye SiO₂ eklenmesi halinde termal genleşme katsayısında düşüş, ısıl iletkenlikle birlikte diğer mekanik özelliklerde de artışa neden olmaktadır. Bu sebepten ötürü SiO₂, kompozit malzeme üretiminde sıklıkla tercih edilen bir katkı malzemesi halini almıştır. Şekil 3.6.'de hidrofilik nano SiO₂ gösterilmiştir.



Şekil 3.6. Hidrofilik nano SiO₂

3.1.1.2.3. Cam elyaflar

Kompozit endüstrisinde üretim ve tüketim miktarları bakımından, en yaygın olarak kullanılan takviye malzemesi cam elyaftır. Cam elyaflar; fiziksel dayanım, saflık, elektrik dayanımı ve kimyasal dayanım gibi pek çok parametreye göre üretilebilmektedirler. Cam elyaf amorf bir malzemedir ve 1 silisyum atomu 4 oksijen atomu ile çevrildiği moleküler yapıdadır. Camın temel yapı taşı olan silisyum hafif, metalik olmayan bir malzemedir ve doğada genellikle oksijenle birlikte SiO₂ şeklinde bulunur. Camın elde edilebilmesi için kullanılan silis kumu, çeşitli katkılarla birlikte 1260 °C civarına kadar ısıtılır ve bu sıcaklıkta eriyen cam soğumaya bırakıldıktan sonra sertleşerek katı bir yapı elde edilir (Bağcı, 2010). Cam elyafların öne çıkan bazı özellikleri şunlardır;

- Kimyasallara karşı dirençlidirler.
- Çekme mukavemeti çok yüksektir.
- Isıl dayanımları oldukça düşüktür. Yanıp kömürleşmezler ancak yüksek ısıda yumuşarlar.

- Yüksek alkali içeriğine sahip olanlar hariç elektrik iletkenlikleri yoktur.
- Nem emme özellikleri yoktur.

Cam elyafların pek çok türü olmakla birlikte bilinen en yaygın 4 türü şu şekilde sıralanabilir (Bağcı, 2010);

1. A (Alkali) Camı: Yüksek oranda alkali içeriğine sahip olmaları sebebiyle elektrik yalıtkanlığı kötüdür. Kimyasallara karşı dirençleri yüksek olup en yaygın cam tipidir.
2. C (Korozyon) Camı: Korozif ortamlara ve kimyasal çözeltilere karşı dirençleri çok yüksektir.
3. E (Elektrik) Camı: Düşük alkali oranıyla elektriksiz yalıtkanlığı çok iyidir. Suya karşı direnci oldukça iyidir ve yüksek mukavemetlidir.
4. S (Mukavemet) Camı: Yüksek mukavemetli camdır. Yorulma dayanımının yüksek olması nedeniyle uzay ve havacılık sektöründe tercih edilir.

Cam elyaflar genellikle epoksi veya plastik reçinelerle birlikte kullanılmaktadırlar. Yaygın olarak kullanılan cam elyafların mekanik özellikleri Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Yaygın kullanılan cam elyafların mekanik özellikleri (Ersoy, 2001).

Özellikler	A-Camı	C-Camı	E-Camı	S-Camı
Özgül ağırlık (gr/cm ³)	2.45	2.45	2.54	2.49
Çekme dayanımı (MPa)	3100	3400	3600	4500
Kopma uzaması oranı (%)	-	4.8	4.8	5.4
Çekme E-Modülü (GPa)	72	70	76	86
Kırılma indisi	1.512	-	1.548	1.523
Isıl genleşme katsayısı (cm/cm K)	-	2.2x10 ⁻⁶	1.6x10 ⁻⁶	1.7x10 ⁻⁶
Lif çapı (mm)			3-20x10 ⁻³	3-13x10 ⁻³

Elyaf lar işlem aşamasında dayanıklılıklarının %50'sini kaybetmelerine karşın son derece sağlamdırlar. Cam elyafı halen karbon ve aramid elyaflarından daha yüksek dayanıklılık özelliklerine sahiptir. Elyaf kumaşları genel olarak sürekli cam elyafının lifleri ile üretilmektedirler. İşlemler sırasında farklı kimyasalların eklenmesi ve bazı özel üretim metodları ile farklı türde cam elyafı üretilebilmektedir (Onat, 2015). Şekil 3.7'da üretimi yapılmış cam elyaf kumaşı gösterilmektedir.



Şekil 3.7. Cam elyaf dokuma kumaş

3.1.1.2.4. Karbon elyaflar

Karbon lifi ilk olarak karbonun çok iyi bir elektrik iletkeni olduğunun bilinmesi nedeniyle üretilmiştir. Cam elyafının metale kıyasla sertliğinin çok düşük olmasından ötürü sertliğin 3-5 kat artırılması belirgin bir amaçtı. Karbon elyaflara çok yüksek ısı işlem uygulandığı zaman bu elyaflar tam anlamıyla karbonlaşırlar ve oluşan bu elyaflara grafit elyafı denir. Günümüzdeyse bu fark ortadan kalkmaktadır yani karbon elyafı da grafit elyafı da aynı malzemeyi tanımlamaktadır. Karbon elyafı epoksi matrislerle birleştirildiğinde olağanüstü dayanıklılık ve sertlik özellikleri ortaya çıkar. Karbon fiber üreticileri sürekli bir gelişim içerisinde çalışmalarından ötürü karbon elyaflarının çeşitleri sürekli değişim göstermektedir. Karbon elyafının üretimi çok pahalı olduğundan dolayı maliyetin ikinci planda olduğu spor gereçlerinde, uçak sanayinde veya tıbbi malzemelerin yüksek değerli uygulamalarında kullanılmaktadır. Karbon elyafının diğer tüm elyaflara kıyasla en önemli avantajı yüksek modül özelliğidir. Karbon elyafı bilinen tüm malzemelerle eşit şekilde karşılaştırıldığında en sert malzemedir (Onat, 2015). Şekil 3.8'de karbon elyaf kumaş örneği gösterilmektedir.



Şekil 3.8. Karbon elyaf dokuma kumaş

3.1.1.2.5. Aramid elyaflar

Aramid elyaflar organik olumakla birlikte mukavemetleri ve rijitlikleri cam ile karbon elyaf arasındadır. Bu aromatik poliamitler naylon türünün bir elemanıdır. Aramid elyaflar karboksilik asit ve amin grubu arasında reaksiyon sonucu oluşmuş amit bağlantısına dayanmaktadır. Kevlar (Dupont) elyaf bu türün en yaygın olarak bilinir. Kevlar 29 ve Kevlar 40 olarak adlandırılmaktadır. Aramid elyafların yapısı, bölgelere ayrılmış yüksek kristalli sıralanmış polimer zincirleri içermektedir. Aromatik halka sisteme termal kararlılık sağlarken, kristalli rijit ve çubuk gibi bir yapı çok güçlü kovalent bağlarla bir arada tutulmaktadır. Fakat zincirler arasında zayıf hidrojen bağları bulunduğundan dolayı gerilmede defibrilasyon hasarına uğrarlar, basınç altındaysa bükülme şeritleri oluşturabilir. Sistem bası gerilmesi altında, kırılma uzaması çekme gerilmesindeki %25'i kadardır. Bu nedenle yükü veya bası gerilmesi içeren uygulamalarda kullanımları sınırlıdır. Basınç altındaki bükülme karakteristiği darbe dayanımının geliştirilmesine imkân sağlamıştır. Üst düzey toklukları sebebiyle aramid elyaflar balistik uygulama alanlarında sıklıkla kullanılmaktadır. Aramid elyafların bilinen en büyük avantajı bası gerilmesi ve yüksek kırılma uzaması altında plastik deformasyona uğrayabileceklerinden ötürü kırılma esnasında yüksek miktarlarda enerji absorbe etmeleridir. Kevlar elyafların yapısı ve bası gerilmesindeki gösterdiği davranışı kompozitlerin çentik hassasiyetini azaltmakta olup karbon ve cam elyafların aksine hasar halinde kırılma ve ani bir davranış ortaya koymasındadır (Campbell, 2010). Şekil 3.9'da aramid elyaf örneği gösterilmiştir.



Şekil 3.9. Aramid elyaf dokuma kumaş

3.1.1.3. Polimer kompozit malzemelerin dayanım bileşenleri

Kompozit malzemelerin mekanik ve fiziksel özellikleri çeşitli parametrelere bağlı olmaktadır. Bu parametreler; matris ve takviye malzemesinin türü, matris ve takviye malzemesinin karışım oranı, takviye malzemesinin yönü, matris ve takviye malzemesinin ara yüzeyi, boyutları ve kompozit sistem içerisindeki homojenliğidir. Bu sebepten ötürü herhangi bir yükleme halinde kompozitin mukavemetinin nasıl etkileneceğinin bilinebilmesi için bu parametrelere hakim olunması gerekmektedir (Yazıcı, 2003).

3.1.1.3.1. Elyaf/reçine hacimsel oranı

Kompozitin takviye malzemesi miktarının artması aynı zamanda mukavemetinin artmasını sağlar. Polimer kompozitlerin en belirgin özellikleri özgül Young modülü ve yüksek özgül mukavemetleridir (mukavemet/özgül ağırlık). Örneğin çeliklerde özgül mukavemet 110 Nm/gr olmasına kıyasla, Karbon-epoksi de 700 Nm/gr, Cam lifi-polyesterde 620 Nm/gr, Kevlar-epoksi de 886 Nm/gr'dır (Türkmen, 2012).

3.1.1.3.2. Elyaf yönü

Kompozit malzemelerde kullanılmakta olan sürekli elyaflar farklı doğrultularda konumlandırılabilirler. Bu doğrultular üç ana guruba ayrılmaktadırlar:

- a) Tek yönlü (0°), bütün elyaflar tek bir doğrultuda ve yönde düzenlenmektedir. Tek yönlü elyaflardan oluşmuş kompozitler elyaf doğrultusunda gelen yüklemelere karşı yüksek dayanım gösterirken, elyaf doğrultusuna dik yönden gelen kuvvetlere karşı düşük dayanım sergilemektedirler. Bu tip malzemeler anizotropik olarak nitelendirilebilirler.
- b) Çift yönlü ($0^\circ/90^\circ$), elyafların bir kısmı 90° 'de konumlanırken diğer kısım 0° 'de konumlanmaktadır. Çift yönlü kompozitler, iki farklı biçimde üretilirler; ya fiberlerin üretim esnasında elyafların birbirine dik yönlerde konumlandırılmalarıyla ya da örülmüş dokuma elyaflar kullanılarak üretilirler. Bu tür kompozitler daha izotropik özellik sergilemektedir. Bu yapıdaki kompozitlerin mukavemetleri her iki yönde de yüksektir.
- c) Elyaflar $0^\circ/60^\circ$ veya $0^\circ/45^\circ$ gibi farklı doğrultularda da konumlandırılabilirler. Bu kompozitler $0^\circ/90^\circ$ dizilimindeki kompozitlerden daha yüksek izotropik özellik gösterirler.

3.1.1.3.3. Elyaf-matris arayüzeyi

Elyaf-matris arayüzeyinin özellikleri ve yapısı kompozitin mekanik özellikleri üzerinde önemli rol oynar. Kompozit malzemenin dayanımı arayüzey kayma düzlemleri ile ilgilidir. Malzemenin matris yapısındaki boşluklar arayüzeyin zayıf olmasına ve buna bağlı olarak yük aktarım mekanizmasının istenildiği gibi çalışmamasına neden olacaktır. Yine arayüzeyde farklı kimyasalların veya nemin bulunması arayüzey özelliklerini olumsuz yönde etkilemektedir.

3.1.1.3.4. Elyaf çapı ve boy/çap oranı

Elyaf çapının malzemenin mukavemeti üzerine büyük etkisi vardır. Küçük çapa sahip çok miktarda elyafın reçine tarafından dengeli ve homojen biçimde ıslatılabilmesi daha zor olmaktadır. Reçine viskozitesi ve sıvının yüzey enerjisinin kritik rol oynadığı ıslatılabilme kavramının başarısı istenilen yüksek mekanik özelliklere ulaşılabilmesi için önemlidir. Malzemeye uygulanan kuvvetin başarılı şekilde dağıtılabilmesi arayüzey oluşumuna ve etkinliğine bağlıdır. Elyafın çapı arttıkça mekanik özelliklerde azalmalar gözlenirken bunun tersi olarak elyaf çapı azaldıkça mekanik özelliklerde artış olduğu görülmektedir. Bunun nedeni küçük çaplı takviye elamanının kattığı yüksek spesifik

yüzey alanı değeridir. Takviye elemanı yüzey alanının artması, ara yüzeyin artması anlamına gelmektedir. Takviye malzemesinin boy/çap oranı artarsa sisteme uygulanan kuvvetin daha geniş alanlara iletilmesi ve sönümlenmesi sağlanmış olunur. Belli başlı şartlar altında elyafın yüksek boy/çap oranı daha yüksek dayanım özellikleri sağlamaktadır (Şahin, 2006).

3.1.1.3.5. Üretim yöntemi ve mikroyapı kusurları

Kompozitin üretim metodunun takviye malzemesi, matris malzemesi, kompozitin kullanım yeri, yapısal özellikler gibi parametrelere göre belirlenmesi gerekmektedir. Sulu veya asidik ortamlarda kullanılacak matris malzemesinin farklılaşması üretim metodunun da değişmesi anlamına gelebilmektedir. Üretim parametrelerindeki hatalardan ötürü kompozit ürünün başarısız olması söz konusu olabilmektedir. Sıcaklık ve basınç parametreleri, kütleme işlemi kompozitin performansını doğrudan etkiler. Homojen olmayan ıslanma, yetersiz ıslanma, yetersiz vakum gibi üretimden kaynaklı hatalarla karşılaşmamak için parametrelerinin üretim öncesinde belirlenmesi gerekir. Kompozitlerin mekanik özelliklerine kompozit malzemenin yapısındaki porozitenin (gözeneklik) ve yabancı artıkların büyük etkisi olmaktadır. Özellikle gözenek sayısının fazla olması kompozit yapıda çatlak oluşmasını ve bu çatlakların ilerlemesini kolaylaştırmaktadır. Bu durumda malzemenin mukavemetinin düşmesi anlamına gelmektedir.

3.1.2. Polimer matrisli kompozitlerin üretim yöntemleri

Üretim metodu seçiminin nasıl yapılacağı sistemde kullanılacak matris ve elyafın cinsine, sistemi oluşturmak ve matrisi kürelemek için gereken sıcaklığa ve maliyete bağlı olarak yapılmaktadır. Genelde, üretilecek olan kompozit malzeme için üretim metodunu seçmek ilk adımlardan biridir. Bunun nedeni, üretim maliyeti, üretim hacmi ve oranı istenen yapının üretimi için belirlenecek üretim metodunun yeterliliğinin önemli olmasıdır. Çünkü her üretim metodu kendince sınırlamalara sahiptir. Bu sebeple, üretilecek malzemeye göre bir seçimin yapılması dikkat edilmesi gereken aşamalardan biridir. Polimer matrisli tabakalı kompozit malzemelerin üretimi elyafların reçineyle doyurulması, elyafların istenilen düzende yerleştirilmesi, reçinenin baloncuk ve uçucu maddelerden arındırılması, polimerin katılaştırılması veya kürlenmesi, kalıptan

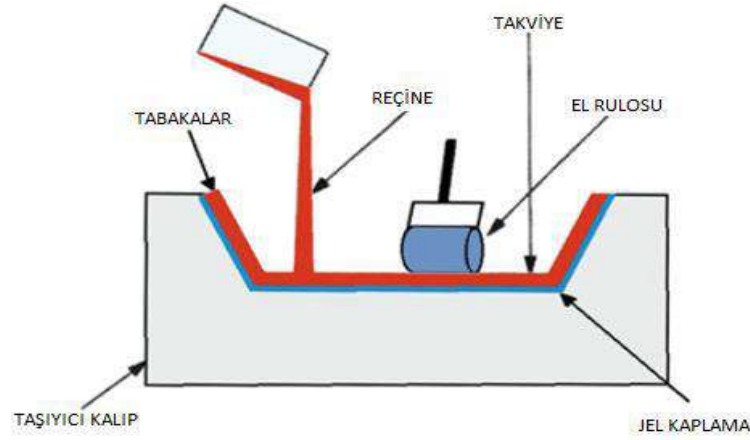
çıkarılması ve üretim sonrasında artan parçaların kesimi gibi son işlemlerin yapılması aşamaların sırasıyla uygulanması biçiminde olmaktadır (Barbero, 2010). Tabakalı kompozit malzemelerin üretimi için kullanılan yöntemler şu şekilde sıralanabilir; vakum torbalama, el yatırma, pultrüzyon, filaman sarım, otoklav, reçine infüzyon yöntemleri, pres kalıplama olarak sayılabilir.

3.1.2.1. El yatırma yöntemi

El yatırma metodu cam elyaf takviyeli kompozit malzemelerin üretiminde yaygınca kullanılan bir yöntemdir. Bu metotla kamyon, otomobil, tekne gibi araçlarda gövde panelleri, yapı sektöründe ise depolama için kullanılan tank gövdeleri, havalandırma sisteminin kanalları, havuzlar gibi pek çok alanda kullanılmaktadır. Bu yöntem polimer matrisli kompozit malzemelerin üretiminde kullanılmakta olan açık bir kalıplama yöntemidir. Bu metodun ucuza mal edilmesi öncelikle üretiminde kullanılan aletlerin ucuz olmasından kaynaklanmaktadır. Eğer seri üretim imalatı yapılmayacaksa yani prototip ya da model üretiminden söz ediliyorsa el yatırma yöntemi tercih edilebilir. El yatırma metodu çeşitli avantajlara sahiptir. Bunlar; üretilecek parçaların boyutlarında bir sınırlama olmaması, kalıp maliyetlerinin düşük olması, değişik biçimlerde kalıp üretilebilmesi gibi avantajları göz önüne alındığında çokça tercih edilen bir yöntemdir (İnançer, 2015).

Bu yöntem bir takım dezavantajlara da sahiptir; bunlar el yatırma metodunu uygulayan kişinin üretimdeki profesyonelliği ile bağlantılı olarak; elyaf dağılımının düzensiz olduğu kısımlarda ya da reçinenin homojen dağılmadığı yerlerde malzeme kalınlığında farklılıklar olabilir. Üretilen kompozit malzemenin boyutlarında çeşitli sapmalar olabilir, ayrıca işlem aşamasında hava kabarcıklarının kalması, elyafların lamine edilirken düzgün yerleşmemesi dolayısı ile malzemenin mekaniksel özelliklerini olumsuz yönde etkileyecek değişiklikler olabilir (İnançer, 2015). Bu metotta polivinil alkol, madeni yağlar, silikon ve vaks gibi malzemeler kullanılarak reçinenin kalıp yüzeyine yapışması önlenmektedir. Böylece kompozit malzemenin kalıptan rahatça çıkarılması sağlanır. Bu metotta takviye elemanı olarak genellikle elyaf, keçe, dokuma gibi malzemeler seçilmektedir. El yatırma yöntemi Şekil 3.10'da gösterildiği gibi uygulanır. Kalıp ayırıcı malzeme sürüldükten sonra elyaf lamine edilerek üzerine reçine rulo şeklindeki bir fırça yardımı ile hava kabarcığı kalmayacak halde uygulanır.

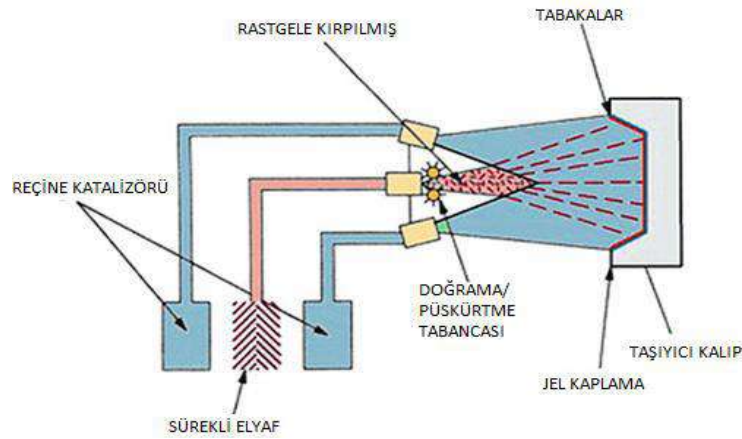
İstenilen kalınlığı elde edene kadar bu tekrara devam edilerek işlem sonlandırılır. Ayrıca el yatırma metodunda elyaf hacim oranı %25-35 civarındadır.



Şekil 3.10. El yatırma yöntemi (İnançer, 2015)

3.1.2.2. Püskürtme yöntemi

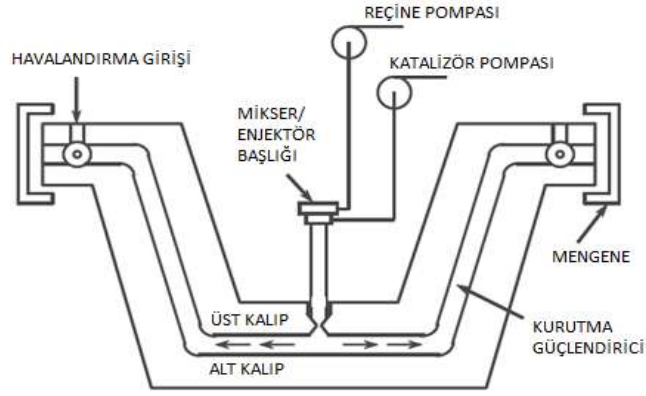
Püskürtme yöntemi genel şekliyle el yatırma metoduna benzeyen fakat kullanılan takviye malzemesinin kırılmış biçimde kullanıldığı çoğunlukla otomobil kaportası, kayık, tekne, tank gibi araçlarda kullanılan bir üretim metodudur. Püskürtme yönteminde Şekil 3.11’de gösterildiği gibi kırılarak küçük parçacıklar haline gelen sürekli elyaflar özel bir tabanca yardımı ile uygun bir hızda reçine ve serleştirici karışımıyla birlikte kalıba püskürtülür. İstenilen kalınlığa ulaşıldığında püskürtme işlemine son verilir. Bu metotta da oluşabilecek hava kabarcıkları bir rulo yardımıyla giderilmektedir. Böylece reçinenin elyafları ıslatma oranı da artmaktadır. Bu üretim yönteminde de kullanılan araç gerecin ucuz olması, üretilecek parçalarda boyut sınırlaması olmaması, işçilik maliyetlerinin düşük olması, karmaşık şekilli parçalarında bu metotla üretilebilmesi açısından avantajlı bir yöntemdir (İnançer, 2015).



Şekil 3.11. Püskürtme yöntemi (İnançer, 2015)

3.1.2.3. Reçine transfer kalıplama yöntemi

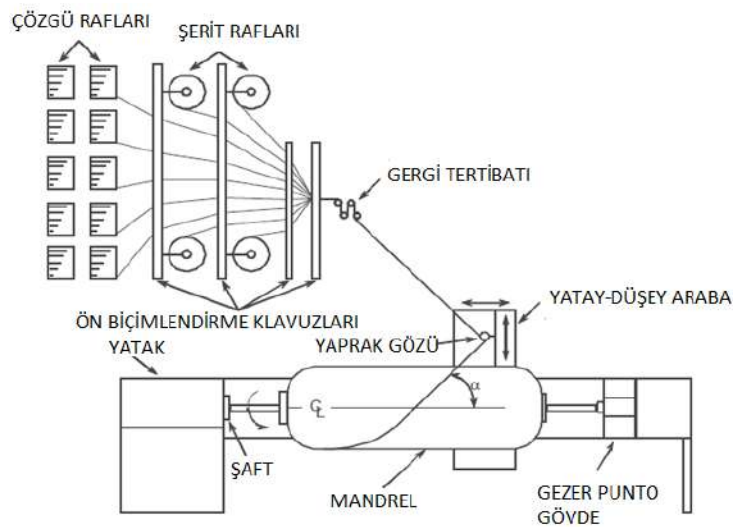
Bu kompozit üretim metodunda elle yatırma yönteminden daha hızlı ve daha uzun ömürlü olmakla birlikte iki parçalı kalıp kullanmak gerekmektedir. Kalıbın kompozit malzemedan yapılması çelik kalıp maliyetine kıyasla daha düşük kalmasına sebep olmaktadır. RTM (reçine transfer metodu) çoğunlukla jel kotlu veya jel kotsuz her iki yüzeyin de düzgün olması istenilen parçalarda kullanılır. Takviye malzemesi olarak kuru keçe, kumaş veya bu ikisinin kombinasyonu kullanılır. Takviye malzemesi kalıp boşluğunu doldurulacak biçimde önceden kalıba yerleştirilir ve kalıp kapatılır. Elyafların kalıp içerisinde sürüklenmesini önlemek amacıyla matris içinde geç çözünen reçinelerle kaplanmaktadır. Reçine basınç altında kalıba pompalanır. Bu üretim süreci daha fazla zaman ister. RTM Şekil 3.12’de gösterildiği gibi uygulanır. Matris enjeksiyonu ılık, soğuk veya en çok 80 °C olacak şekilde ısıtılmış kaplarda uygulanabilir. Bu metotta içerideki havanın dışarı atılması ve reçinenin elyaf içine iyi işlemesi amacıyla vakum kullanılabilir. Elyafın kalıba yerleştirilmesi gereksiniminden dolayı uzun sayılabilecek bir işçilik işlemi gerektirir. Kalıp kapalı olduğundan dolayı zararlı gazlar azalır ve gözenekli bir ürün elde edilebilir. Bu metotla karmaşık parçalar üretilebilir (Onat, 2015).



Şekil 3.12. Reçine transfer kalıplama yöntemi (İnançer, 2015)

3.1.2.4. Elyaf sarma yöntemi

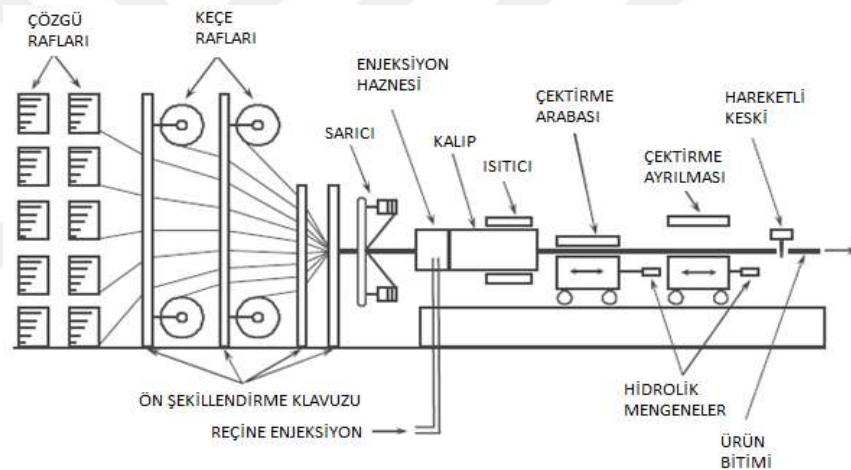
Elyaf sarma metoduyla boru, roket gövdesi, basınçlı tank, direk gibi silindirik biçimde parçalar üretildiği bir açık kalıp yöntemidir. Bu metotta genellikle dönen bir çelik mil kullanılır. Bazı özel uygulamalar içinse şişirilip söndürülebilir esnek miller de kullanılabilir. Bu yöntem de Şekil 3.13'te gösterildiği gibi reçine bulunan bir haznedan geçirilen sürekli elyaflar olmasını istediğimiz açılarda ayarlanarak milin üzerine sarılır, sarma işlemi milin sürekli olarak ileri geri hareket veren bir araba yardımı ile belli bir gerginlikte arzu edilen kalınlığa ulaşıncaya kadar devam eder. Reçine sertleştikten sonra malzeme milin üzerinden çıkartılarak üretim işlemi sonlandırılır.



Şekil 3.13. Elyaf sarma yöntemi (İnançer, 2015)

3.1.2.5. Pultrüzyon yöntemi

Pultrüzyon metodu sabit ve sürekli kesitli üretilecek olan ürünler; inşaat sektörü, yapı, açık alanlarda kullanılacak mobilyalar ve seracılık gibi tasarımlarda kullanılır. Bu metotta keçe ve cam elyaf takviye elemanı olarak kullanılmaktadır. Takviye elemanı öncelikle ön bir ıslatma için, içinde reçine bulunan bir haznedan geçirilir ve bu işlemde sonra ısıtma özelliğine sahip kalıplardan geçirilerek arzu edilen şekil verilir. İstenilen şeklin verildiği ürün çekme ünitesinde ulaşılmak istenilen boyuta getirilmesinden sonra belli boylarda kesilerek nihai haline getirilir. Düşük yatırım maliyeti ve uygulama alanının büyük olması nedeniyle yaygın olarak kullanılan bir metottur. Bu yöntem Şekil 3.14’de gösterildiği gibi uygulanmaktadır (İnançer, 2015).

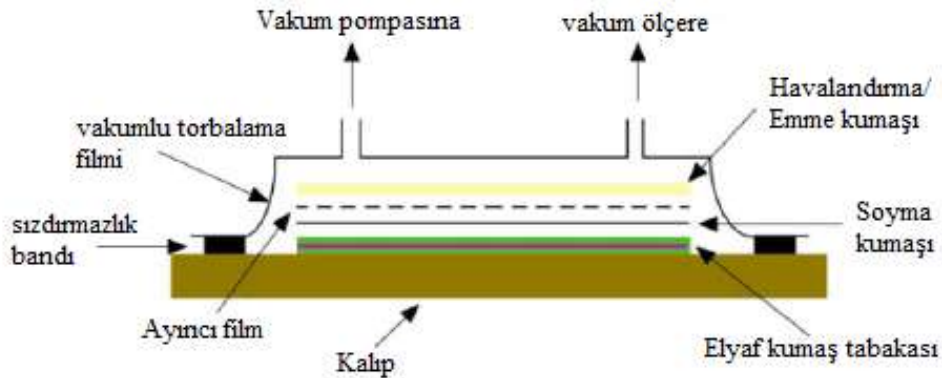


Şekil 3.14. Pultrüzyon yöntemi (İnançer, 2015)

3.1.2.6. Vakum torbalama yöntemi

El yatırma yönteminin bir alternatifi olan vakum torba kalıplama metodunda ise, kalıba elyaf kumaşlar lamine edilip reçine emdirildikten sonra üzeri esnek bir vakum torbasıyla kapatılır. Torba ile tabakanın birbirine yapışmaması amacıyla bu ikisinin arasına soyma kumaşı yerleştirilir ve reçinenin düzenli dağılımını sağlamak amacıyla dağıtıcı kumaş da eklenir. Parça torba ile iyice izole edildikten sonra vakum basıncı yardımı ile düz bir yüzey elde etmek amaçlanır. Ayrıca vakum basıncı yardımıyla; yapı içinde sıkışmış hava ve zararlı uçucu gazlar da sistem dışına atılır. Vakum torbalama yöntemi Şekil 3.15’ de gösterildiği gibi uygulanmaktadır. Diğer yöntemlerde olduğu

gibi k rleŖme olunca vakum iŖlemi sona erdirilerek malzeme kalıptan çıkartılır. Vakum torbalama yüksek kaliteli, büyük boyutlu, d Ŗ k maliyetli kompozitlerin üretilmesine olanak sağlar. BaŖlıca avantajı ise k rleme ekipmanının ve vakumlamanın farklı parçalarda kullanılabilir olmasıdır. Fakat parça kalitesi üretim iŖlemini yapanın becerisine bağlıdır. Vakum torbalama ile üretilen kompozitlerde daha az gözenek ve hava kabarcığı oluŖur. Reçinenin elyafların arasına dağılma oranı artar ve sistemden atılan fazla reçineyle reçine havuzu oluŖumu engellenir böylece ürünün ağırlığı kontrol altında tutulabilmektedir. Zehirli gazların ortama yayılmasının daha az olduğu vakum torbalama kompozit üretim metodunda iŖilik sprey ile üretime ve el ile tabakalamaya göre daha fazladır. Termoset ve termoplastikler aynı biçimde üretilmekle beraber termoplastiklerde kullanılacak olan vakum torbasının yüksek sıcaklıklara dayanabilmesi gerekmektedir. Ayrıca termoplastiklerin yüksek basınç gerektirmeleri ve yüksek viskoziteleri de iŖlemi karmaŖılaŖtırmaktadır. Üstün kaliteli termoplastik matrisli kompozitler genel olarak maliyetin fazla önemli olmadığı uzay ve havacılık ile tıbbi malzemeler gibi alanlarda kullanılır (Barbero, 2010).



Ŗekil 3.15. Vakum torbalama yöntemi (Gay, 2014)

Bu yöntemin avantaj ve dezavantajları Ŗu Ŗekilde sıralanabilir:

Avantajları;

- Vakum torbası kapalı ve izole bir ortam oluŖturarak sağlığa zararlı olabilecek uçucu maddelerin solunumu ve emilimini azaltır.
- El yatırma yöntemine kıyasla daha yüksek bir fiber oranı elde edilebilir.
- El yatırma yöntemine kıyasla daha az hava kabarcıkları ve boŖluklar meydana gelir.

- Vakum uygulaması sayesinde reçinenin tüm katmanlar arasında daha iyi ve homojen yayılması sağlanmaktadır. Bu sayede analitik ve sayısal yöntemler yoluyla kompozit sistemin mukavemeti daha doğru biçimde hesaplanabilmektedir.
- Vakum sayesinde reçinenin liflerin arasına yayılması kolaylaşır ve basınç ile fazlalık reçine dışarı atılarak reçine lif oranının artması sağlanır. Bu sayede kompozit malzemenin kırılma dayanımı azalmaktadır.
- Vakum uygulaması esnasında elyaf katmanları birbirleri üzerine basacaklarından, katmanların birbirleriyle olan birleşim dayanımı daha güçlü olacaktır. Başka bir deyişle katmanlar arası kesme dayanımı artacaktır (Turgut, 2010).

Dezavantajlar;

- Vakumlamayla üretim işleminde kaliteli ve tecrübeli iş yapan kişilere ihtiyaç vardır.
- İlave işgücü vardır ve tek kullanımlık malzemeler kullanılmaktadır, bu nedenlerden ötürü üretim maliyeti artar. Özellikle küçük parçalarda vakum naylonu yerine birden çok kez kullanılabilen vakum torbaları geliştirilmiş olsa da ilave maliyet gereksinimi sıfırlanamamıştır.

4. MATERYAL VE YÖNTEM

Yapılan bu çalışma iki aşamalı gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada matris özelliklerini iyileştirilmede kullanılmış olan SiO₂ ve ÇCKNT nanopartiküllerinin matris modifikasyonu için uygun değerini belirlemek amacıyla literatürden de alınan bilgiler doğrultusunda ağırlıkça %0.5, 1.0, 1.5 ve 2 oranlarında nanopartikül ilaveli kütleli numuneler, ASTM D638 çekme testi standartlarına uygun olarak üretilip testler uygulanmıştır. Numunelerin hasarlı yüzeyleri optik mikroskop ile incelemiştir.

Çalışmanın ikinci kısmında ise nanopartikül ilavesinin cam ve karbon elyaf takviyeli tabakalı kompozit numunelerde mekanik özelliklere etkisini görmek amacıyla önce vakum torbalama yöntemi ile numuneler üretilmiştir. Ardından farklı gerilmeler altında davranışlarını incelemek için ASTM D3039 standardına uygun olarak çekme, ASTM D7264 standardına uygun olarak üç nokta eğme testleri yapılmıştır. Birinci aşamada olduğu gibi yine hasarlı yüzeyler optik mikroskop ile incelenmiştir.

4.1. Malzemeler ve Özellikleri

Tez çalışmasında matris olarak kullanılan epoksi Fibermak markasına ait F-1564 reçinesi olup viskozitesi 1200-1400 mPa·s ve sertleştirici ise Fibermak marka F-3486 10-20 mPa·s viskoziteli sertleştiricidir. Epoksi reçinenin mekanik özellikleri Çizelge 4.1'de verilmiştir. Bu epoksinin seçilmesinde etkin olan unsur elyaf takviyeli kompozitlerde ıslatmasının yüksek ve kürleşme süresinin uzun olmasıdır.

Çizelge 4.1. Epoksi reçineye ait mekanik özellikler (Fibermak)

Özellikler	Değer	Birimi
Yoğunluk	1.1-1.2	(gr/cm ³)
Viskozite	1200-1400	mPa·s
Çekme dayanımı	60-65	(MPa)
Eğilme dayanımı	110-125	(MPa)

Çalışmada kompozit malzemenin yapısına ilave edilerek mekanik, termal ve mikroyapı özellikleri üzerindeki etkileri incelenen ilk takviye malzemesi ÇCKNT olmuştur. Kullanılan KNT matris-elyaf-partikül arayüzey etkinliğini arttırmak için çok cidarlı olarak seçilmiş ve herhangi bir fonksiyonelleştirme uygulanmamıştır.

ÇCKNT'ler epoksi reçine+serleştirici karışımı içerisinde ağırlıkça %0.5, 1, 1.5 ve 2 oranlarında katılmıştır. ÇCKNT'lerin teknik özellikleri Çizelge 4.2'de verilmektedir.

Çizelge 4.2. ÇCKNT'nin teknik özellikleri (nanografi)

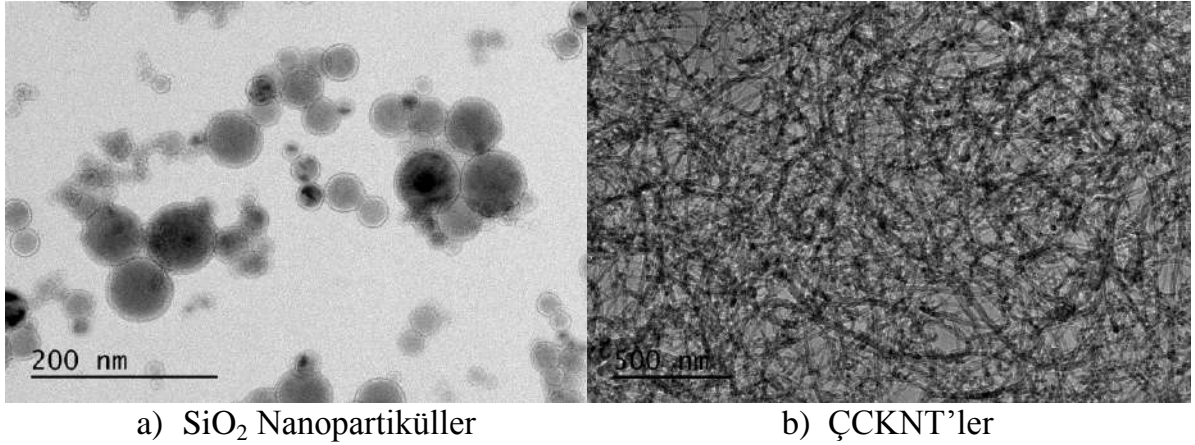
Özellikler	Değer/ Durumu
Saflık (%)	96
Uzunluk (µm)	0.5-2
Dış Çap (nm)	28-48
İç Çap (nm)	5-15
Yüzey Alanı (m ² /gr)	65
Yoğunluk (gr/cm ³)	2.4
Elektrik İletkenliği (S/cm)	98
Renk	Siyah

Çalışmada kompozit malzemenin yapısına katılarak mekanik ve mikroyapı özellikleri üzerindeki etkileri incelenen ikinci tür takviye malzemesi nano SiO₂ olmuştur. SiO₂'nin kompozitin yapısına ileve oranları, reçinenin ağırlığına oranla %0.5, 1, 1.5 ve 2 olarak hesaplanmıştır. Nano SiO₂'nin teknik özellikleri Çizelge 4.3'de verilmektedir.

Çizelge 4.3. SiO₂'nin teknik özellikleri (nanografi)

Özellikler	Değer/ Durumu
Saflık (%)	99.95+
Ortalama Çap (nm)	13-22
Yüzey Alanı (m ² /gr)	165-195
Yoğunluk (gr/cm ³)	2.2
Renk	Beyaz
Morfoloji	Küresel

Çalışmada kullanılan ÇCKNT ve SiO₂ nanopartiküllerinin şekil ve boyutlarının belirlenmesi bunun yanında epoksi içindeki dağılımını görmek amacıyla çekilen geçirimli elektron mikroskobu (TEM) görüntüsü Şekil 4.1'de verilmektedir.



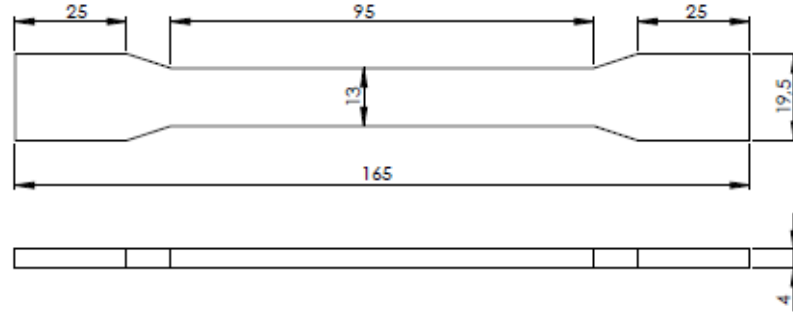
Şekil 4.1. SiO₂ ve ÇCKNT'lerin TEM görüntüleri

Elyaf seçiminde ise endüstride yaygın olarak kullanılan ve ekonomik olan cam ve karbon elyaf tercih edilmiştir. Elyaf kumaş türlerinden ise dikişli ve elyaf oryantasyonunun 0/90° düzeninde olan kumaş tercih edilmiştir. Elyaf kumaşlar “Fibermak Kompozit” firmasından temin edilmiş olup yoğunluğu 300 g/m² olarak tedarik edilmiştir. Elyaf oryantasyonu tercihinde testlere uygunluğuna göre tercih yapılmıştır.

4.2. Epoksi/Nanopartikül Kompozit Numunelerin Üretilmesi

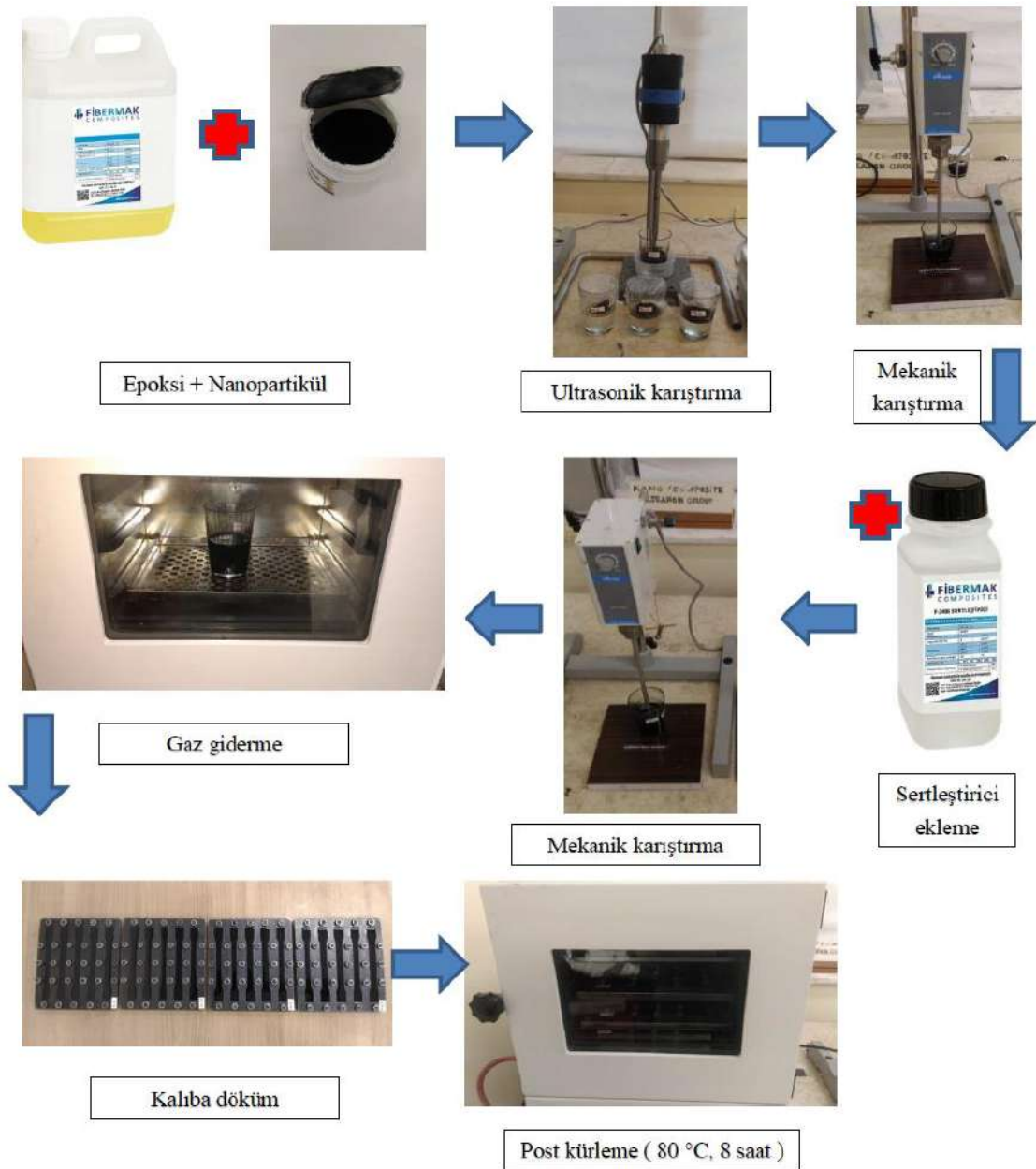
Çalışmanın ilk aşaması matrisin mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi amaçlı en uygun nano ilave oranının belirlenmesidir. Bu sebeple, öncelikle ASTM D 638-14 çekme testi standartlarına uygun olarak kütleli numuneler üretilmiştir.

Çalışmaya ilk olarak kontrol numunesi olan saf epoksi numunelerin üretilmesiyle başlanmıştır. Epoksi reçine ve sertleştiricisi ağırlıkça 100/34 oranında karıştırılmış ve ardından bu esnada oluşan gaz kabarcıklarının giderilmesi için vakumlu etüvde 22 °C sıcaklık, 0.75 bar vakum şartlarında 10 dakika gaz giderme işlemine tabii tutulduktan sonra standartlara uygun olan çekme numunesi kalıbına dökülmüştür (Şekil 4.2). Bu işlemlerin devamında ise post kür işlemi 8 saat ve 80 °C sıcaklıkta uygulanmıştır (Erdal ve ark., 2018; Gemi ve ark., 2017; Yazman ve ark., 2015).



Şekil 4.2. ASTM D 638-14 test numunesi ölçüleri

Nanopartikül ilaveli numunelerin üretiminde ise epoksi matrise sırasıyla ağırlıkça %0.5, 1, 1.5 ve 2 oranlarında nanopartikül ilave edilmiştir. Ancak çalışmanın ikinci kısmını oluşturan tabakalı kompozit üretimi vakum torbalama yoluyla yapılmıştır. Matris içinde iyi dağıtılmamış nanopartiküller istenmeyen sonuçlar verebilmektedir. Bunlara ek olarak bazı cam elyaf kumaşlar nanopartiküllere filtreleme yapabilmektedir. Tüm bu bilgiler ışığında belirtilen oranlarda nanopartikül ilaveli kompozitler için, önce epoksi reçine tartılmış ve buna bağlı olarak nanopartikül miktarı hesaplanıp epoksi reçine ile ultrasonik homojenizatörde 10'ar dak. aralıklarla toplam 30 dak. boyunca buz banyosu içinde karıştırılmıştır. Daha sonra yine 10'ar dak. aralıklarla toplam 20 dak. 800 dev/dak. mekanik karıştırma uygulanmıştır. Sonrasında belirtilen oranda (%34) sertleştirici ilave edilerek mekanik olarak 10 dak. daha karıştırılmış ardından gaz giderme işlemi uygulanıp çekme standardına uygun kalıplara dökülmüştür. Son aşamada ise 8 saat boyunca 80 °C sıcaklıkta post-kürleme işlemi uygulanmıştır. Çekme numunelerinin üretim aşamaları Şekil 4.3'de verilmiştir.



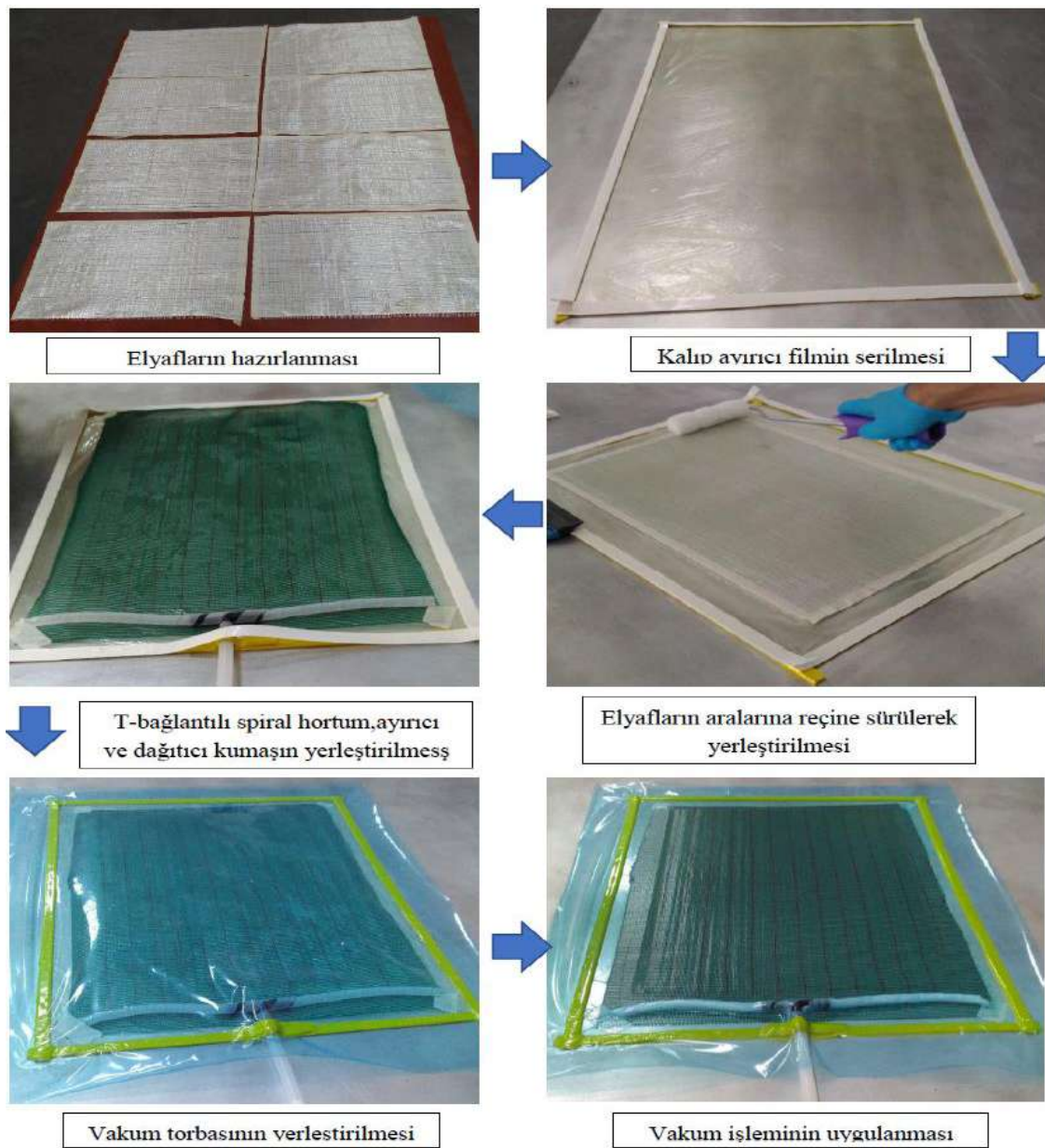
Şekil 4.3. Çekme numunelerinin üretim aşaması

4.3. Epoksi/Nanopartikül Kompozitin Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi

Vakum torbalama yöntemiyle üretilmiş olan SiO₂ ve KNT nanopartikül ilaveli cam ve karbon elyaf takviyeli kompozitlerde kullanılmak amacıyla önce en uygun değer belirlenmelidir. Bu kapsamda, ASTM D638 çekme testi standardına uygun olarak, universal çekme test cihazında (SHIMADZU) 2 mm/dak. sabit hızla uygulanmıştır. Deney tekrar sayısı ise 5 olarak belirlenmiştir. Sonuç olarak nanopartikül ilavesi yapılmış ve saf epoksi polimer kompozitlerin mekanik özellikleri belirlenmiştir.

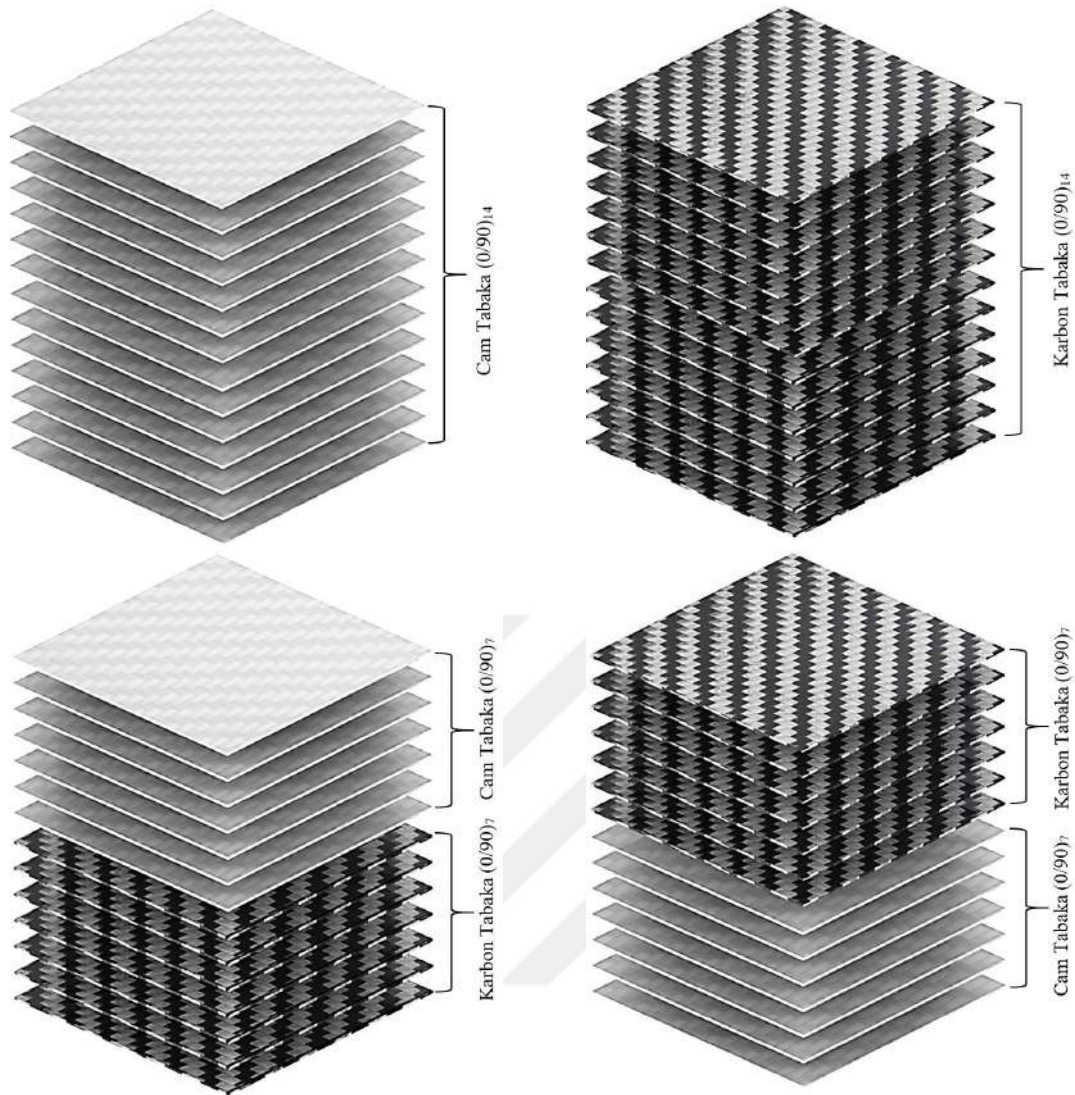
4.4. Kompozit Plakaların Üretimi

İlk aşamada belirlenmiş uygun oran kullanılarak bu bölümde ÇCKNT ve SiO₂ nanopartikül ilaveli cam ve karbon elyaf takviyeli kompozit plakalar üretilmiştir. Tabakalı kompozit numuneler üretilirken vakum torbalama yöntemi kullanılmış ve sonrasında bu plakalardan test numuneleri test standartlarına uygun ölçülerde olacak şekilde kesilerek çıkarılmıştır. Vakum torbalama ile üretim, şematik olarak Şekil 4.4’de gösterilmiştir.



Şekil 4.4. Vakum torbalama işlemi şematik gösterimi

Vakum torbalama ile plakalar üretilirken şu aşamalar izlenmiştir; öncelikle kullanılan kalıp kompozit malzemenin mekanik özelliklerine etki edebilecek toz ve kirlerden arındırılmıştır. Kalıbın üretim işlemi sonrasında kompozit plakanın rahatça ayrılabilmesi için kalıp ayırıcı film yerleştirilmiştir. Kalıp ayırıcı filmin etrafınaysa sızdırmazlık bandı yapıştırılmıştır. Kalıp ayırıcı filmin üzerine $0^{\circ}/90^{\circ}$ düzeninde olan cam ve karbon elyaflar 3 mm kalınlığını sağlamak üzere 14 kat serilmiştir (Şekil 4.5). Elyaf kumaşların üzerine de ayırma kumaşı ve dağıtıcı file serilecek şekilde kesilip hazırlanmıştır. Ardından vakum hattı spiral hortumun içine t bağlantılar elyaf kumaştan biraz uzağa yerleştirilecek şekilde hazırlanmıştır. Vakum torbası sızdırmazlık bantlarından taşacak şekilde kesilmiştir. Sistem vakuma alınmadan önce, bulk numune üretiminde olduğu gibi hazırlanan saf epoksi/sertleştirici ve nanopartikül ilaveli epoksi/sertleştirici karışımları, $0^{\circ}/90^{\circ}$ düzeninde olan cam ve karbon elyaf kumaşların her bir katmanına tek tek sürülerek dağıtılmıştır. Bu işlemde kesilmiş olan ayırıcı kumaş ile dağıtıcı file sırasıyla yerleştirilmiştir. Vakum ile çekilecek olan reçinenin vakum pompasına gelmemesi için vakum pompasından gelen hortum bir kaba yerleştirilmiş ve bağlantının etrafı sızdırmazlık macunu ile sıkı bir şekilde kapatılıp vakum kontrol edilmiştir. Ardından vakum hattı ile t bağlantı birleştirilmiş ve hava kaçağı olmaması için bağlantının etrafı sızdırmazlık macunu ile güçlü bir biçimde kapatılmıştır. Tüm kumaşlar en son vakum torbası ile tamamen kapatılmış ve torba sızdırmazlık bantları üzerine düzgün bir şekilde yerleştirilmiştir. Son olarak ise vakum pompası çalıştırılıp reçinenin elyaf kumaşın her bölgesine ulaşması sağlanmış aynı zamanda oluşan hava kabarcıkları da vakum yardımıyla atılmıştır. Reçinenin tamamen dağıtıldığından emin olduktan sonra vakum altında kürlenmek üzere bırakılması için vakum hortumu kıvrılıp vakumun kaçması engellenerek vakum pompası kapatılmıştır. Ardından 8 saat 80°C 'de post kütleme işlemi uygulanmıştır. Üretilen kompozit numunelerin kodlamaları yapılarak Çizelge 4.4'de verilmiştir.

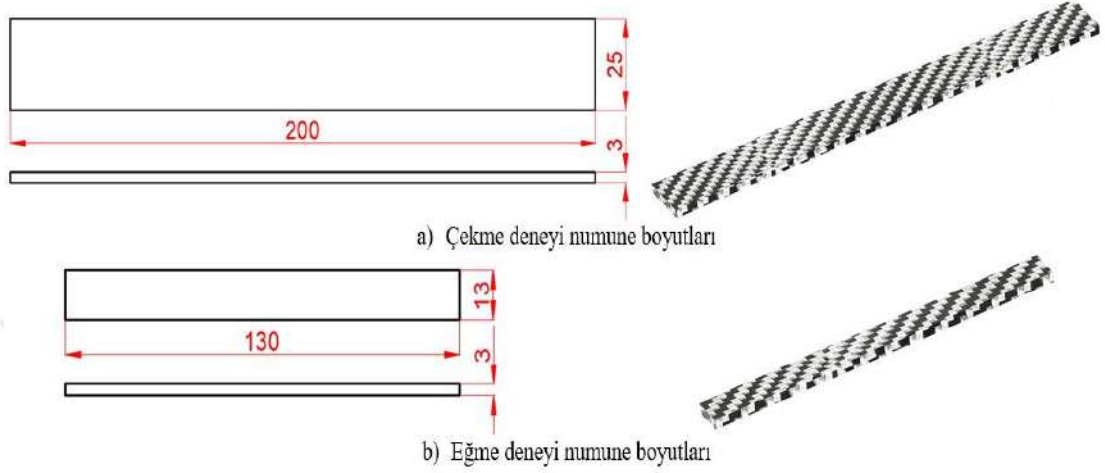


Şekil 4.5. Tabakalı kompozitlerin katman yapısı

Çizelge 4.4. Denejde kullanılan kompozit numunelerin kodlaması

NUMUNE	NUMUNE KODU
Saf epoksi_ cam fiber takviyeli kompozit	SC_K
Saf epoksi_ karbon fiber takviyeli kompozit	SK_K
Saf epoksi_ hibrit fiber takviyeli kompozit	SH_K
Saf epoksi_ hibrit (KARBON/CAM) fiber takviyeli kompozit	SH(K/C)_K
Saf epoksi_ hibrit (CAM/KARBON) fiber takviyeli kompozit	SH(C/K)_K
%1.5 SiO ₂ epoksi_ cam fiber takviyeli kompozit	NSC_K
%1 KNT epoksi_ karbon fiber takviyeli kompozit	NKK_K
Nano (SiO ₂ +KNT) epoksi_ hibrit fiber takviyeli kompozit	NH_K
Nano (SiO ₂ +KNT) epoksi_ hibrit (KARBON/CAM) fiber takviyeli kompozit	NH(K/C)_K
Nano (SiO ₂ +KNT) epoksi_ hibrit (CAM/KARBON) fiber takviyeli kompozit	NH(C/K)_K

Üretilen tabakalı levha kompozitlerden çekme ve üç nokta eğme deneyleri için numuneler tezgâh üstü testere yardımı ile kesilerek hazırlanmıştır. ASTM D3039 standardına uygun olarak çekme testi için 200x25x3 mm ve ASTM D7264 standardına göre eğme testi için 130x13x3 mm boyutlarında numuneler hazırlanmıştır (Şekil 4.6).



Şekil 4.6. Çekme ve eğme numunelerinin boyutlandırılması

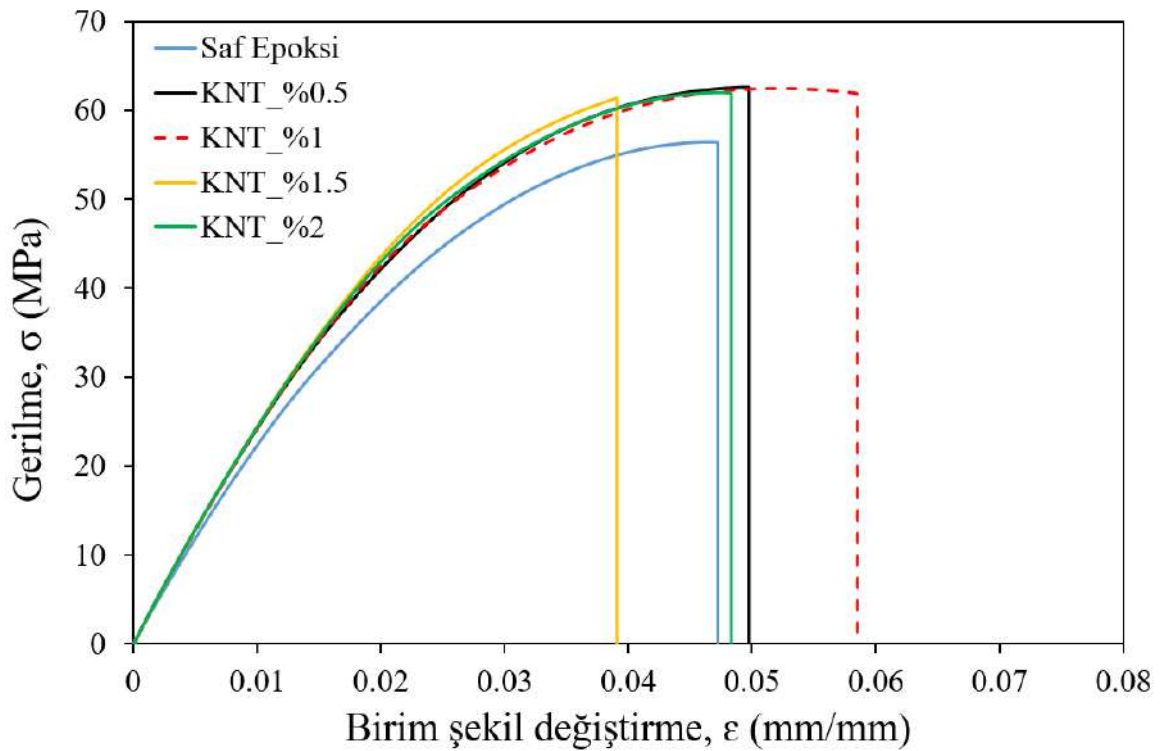
4.5. Tabakalı Kompozit Plakaların Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi

KNT ve SiO₂ nanopartikülünün cam ve karbon elyaf/epoksi tabakalı kompozitinin mekanik özelliklerine etkisini belirlemek amacıyla farklı gerilme davranışları altında testler uygulanmıştır. Shimadzo markalı universal çekme cihazında ASTM D3039 standardına göre, 2 mm/dak. hızında çekme testi 3 tekrar olarak yapılmıştır. ASTM D7264 standardına göre yüklem hızı 3 mm/dak. olarak her bir parametre için üç nokta eğme testi 3 tekrar yapılmıştır. Sonuç olarak ise nanopartikül ilavesi yapılmış ve yapılmamış tabakalı kompozitlerin mekanik özellikleri incelenmiştir.

5. BULGULAR VE TARTIŞMA

5.1. Epoksi/Nanopartikül Nanokompozitin Mekanik Özellikleri

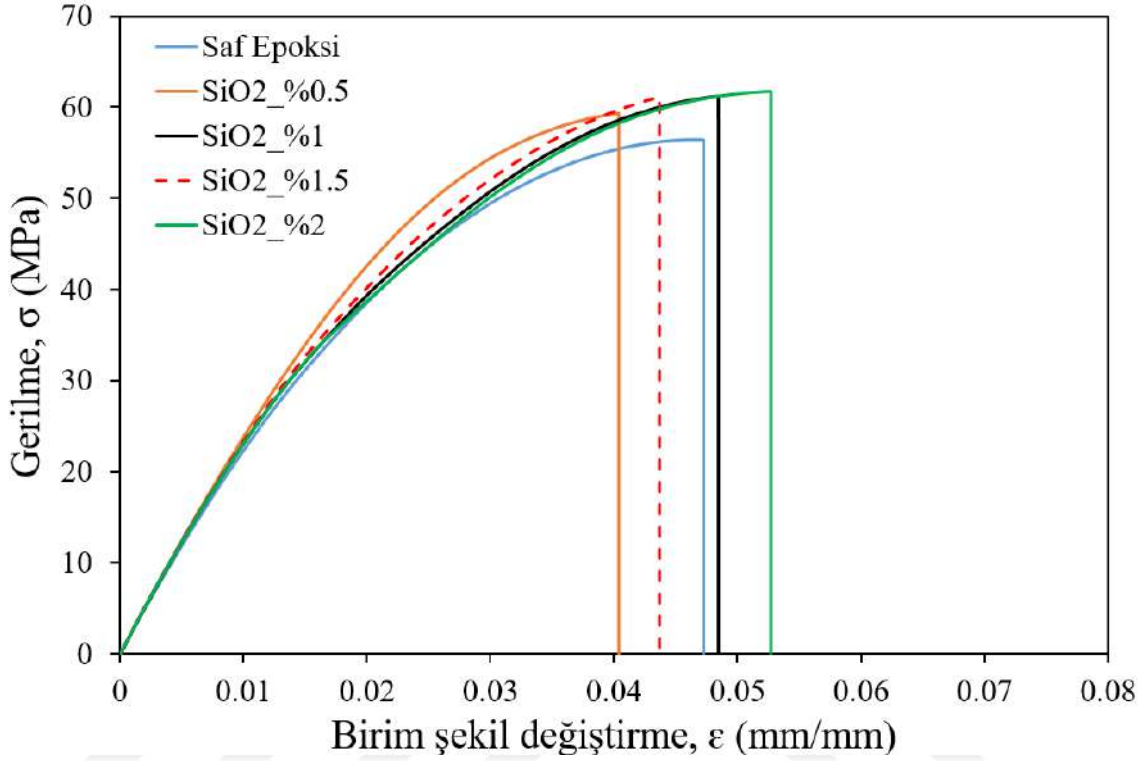
Nanopartikül ilaveli ve saf epoksi olarak üretilen çekme deneyi numunelerinin testleri sonucunda elde edilen gerilme-birim şekil değiştirme grafiği KNT ve SiO₂ için Şekil 5.1 ve Şekil 5.2’de verilmiştir. Uygulanan çekme deneyi sonucu elde edilen veriler ile çekme mukavemeti Şekil 5.3’de, yüzde uzama Şekil 5.4’de, tokluk değerlerinin bulunduğu grafik Şekil 5.5’de, Young Modülü değerlerinin bulunduğu grafiğe Şekil 5.6’da, epoksi numunelerin tekrarlanabilirliğine dair grafik Şekil 5.7’de verilmiştir. Ayrıca, saf epoksiden üretilen kontrol numunesinin özellikleriyle yapılan karşılaştırma Çizelge 5.1 ve Çizelge 5.2’de verilmiştir.



Şekil 5.1. KNT ilaveli epoksi kompozitlerin çekme gerilmesi-birim şekil değiştirme grafiği

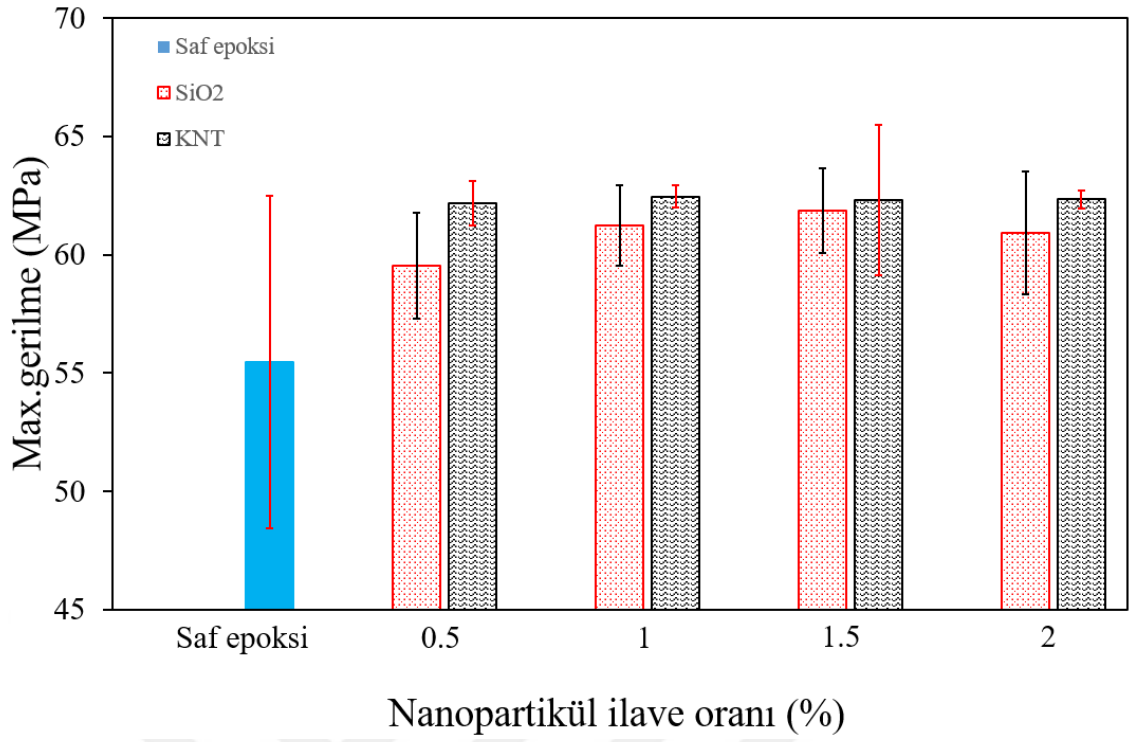
En yüksek çekme mukavemeti açısından incelendiğinde, KNT için en iyi sonuç; saf epoksiye göre %12.60 artış ile KNT ilave oranı %1 olan nanokompozit numunesinden elde edilmiştir. Öte yandan, KNT ilaveli numuneler çekme dayanımında birbirine yakın sonuçlar elde edilse de %0.5 KNT takviyesi olan numune %12.09 artışla en düşük sonucu vermiştir. Statik tokluk değerleri açısından incelendiğinde ise KNT

takviyeli numunelerde yine saf epoksiye göre en iyi sonuç %72.22 artış ile %1 KNT nanopartikül ilaveli kompozit numunesinden elde edilmiştir. En kötü sonuç ise %15.54 artış ile ilave oranı %1.5 olan numunede görülmüştür.

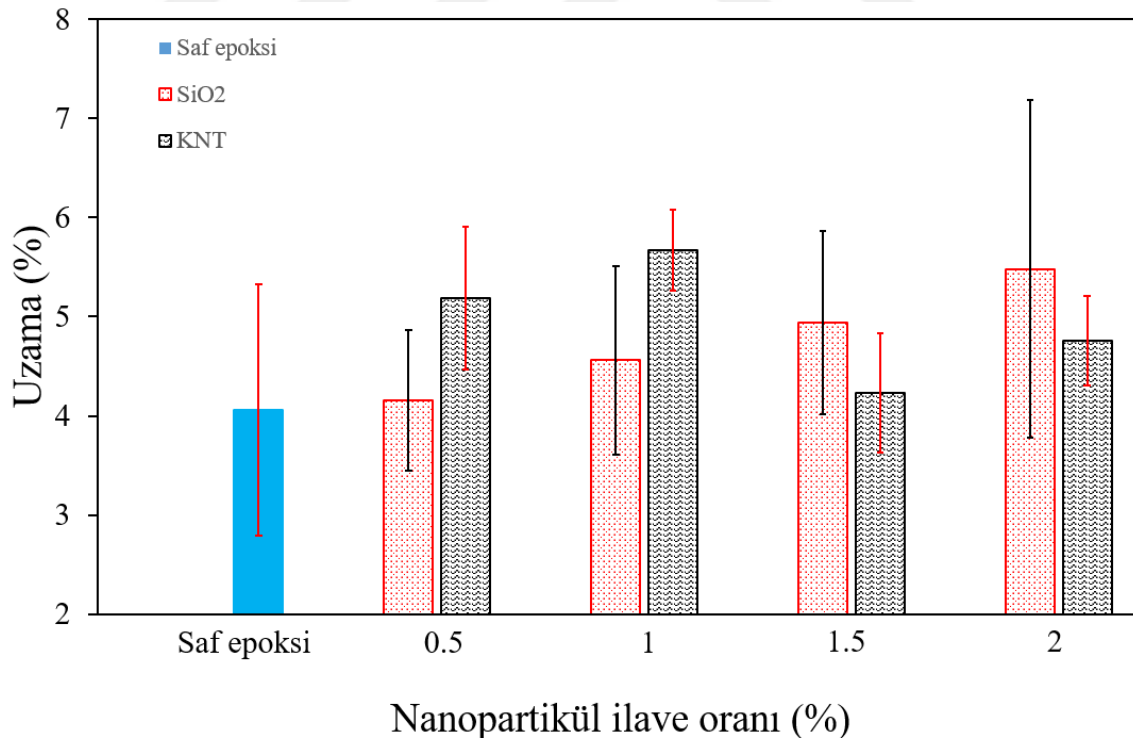


Şekil 5.2. SiO₂ ilaveli epoksi kompozitlerin çekme gerilmesi-birim şekil değiştirme grafiği

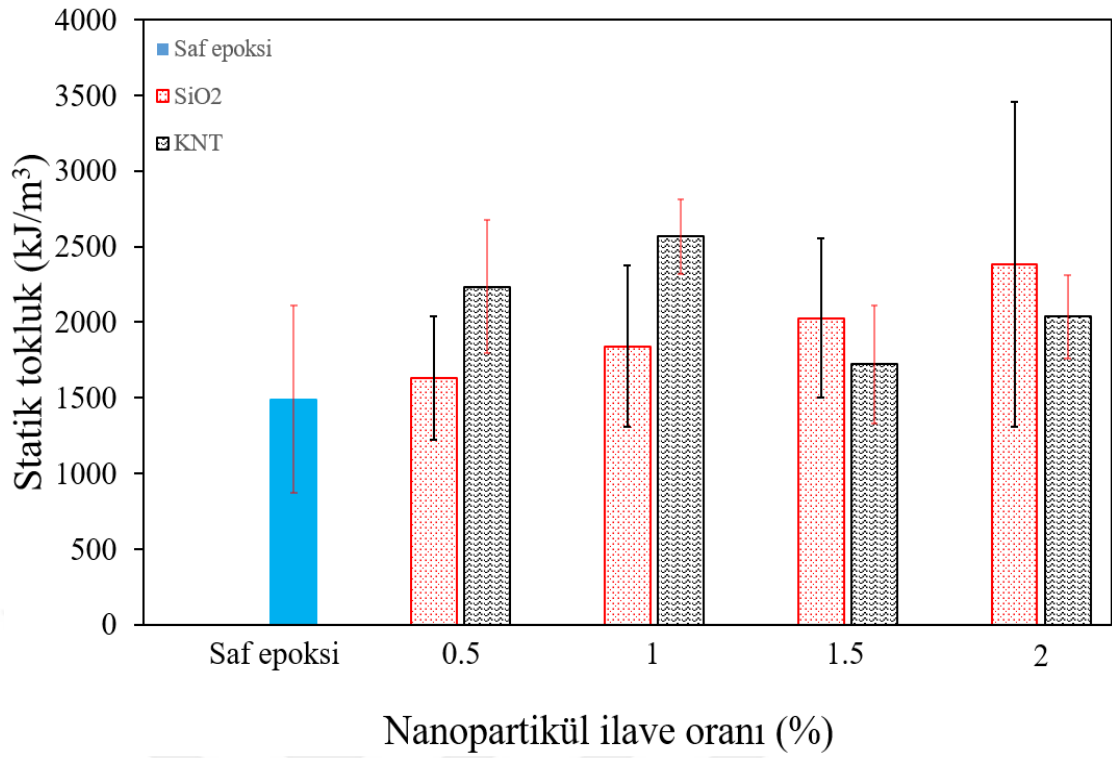
Çekme mukavemeti açısından SiO₂ takviyeli numuneler için en iyi sonuç: saf epoksiye göre %11.53 artış ile SiO₂ oranı %1.5 olan nanokompozit numunesinden elde edilmiştir. Sonuçlar karşılaştırıldığında %0.5 SiO₂ takviyeli numune %7.35 artışla en düşük sonucu vermiştir. Tokluk değerleri bakımında SiO₂ takviyeli numunelerde en iyi sonucu saf epoksiye göre %60.11 artışla %2 SiO₂ takviyeli numunede görülmüştür. Ancak, SiO₂ ilave oranı azaldıkça tokluk değerlerinde düşüşler görülmüştür ve en düşük sonuç %0.5 ilaveli numunede %9.50 artış ile görülmüştür.



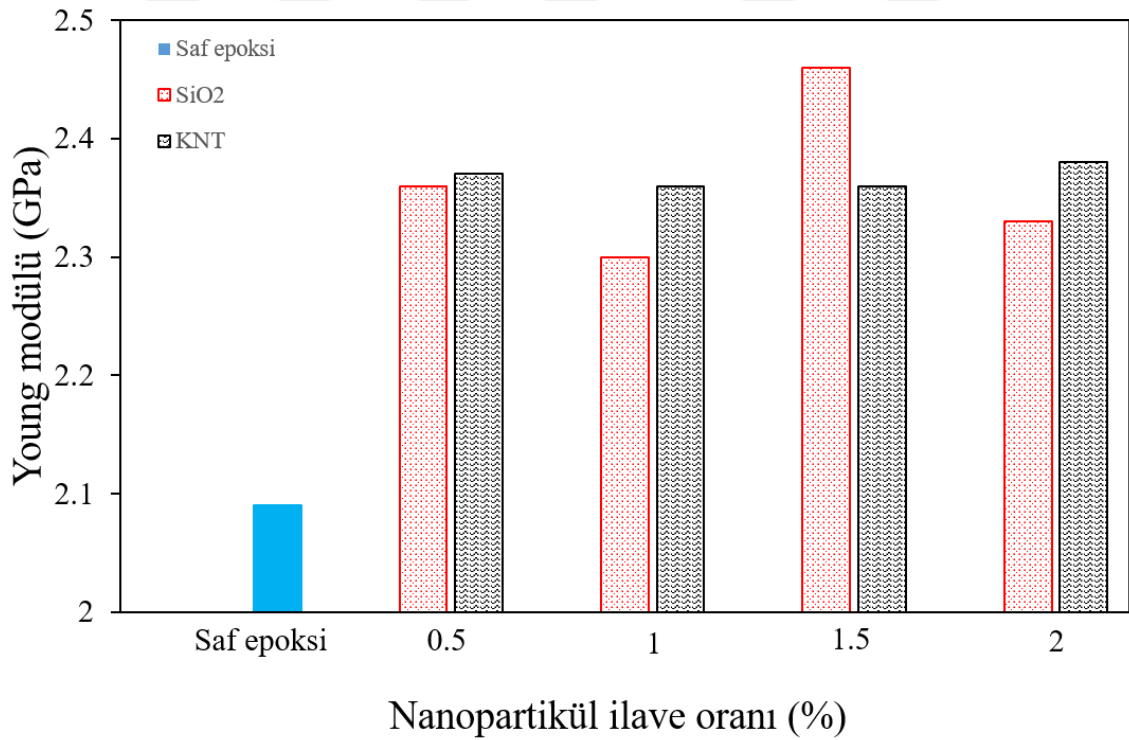
Şekil 5.3. Nanokompozitlerin çekme mukavemeti değerleri



Şekil 5.4. Nanokompozitlerin yüzde uzama değerleri



Şekil 5.5. Nanokompozitlerin statik tokluk değerleri



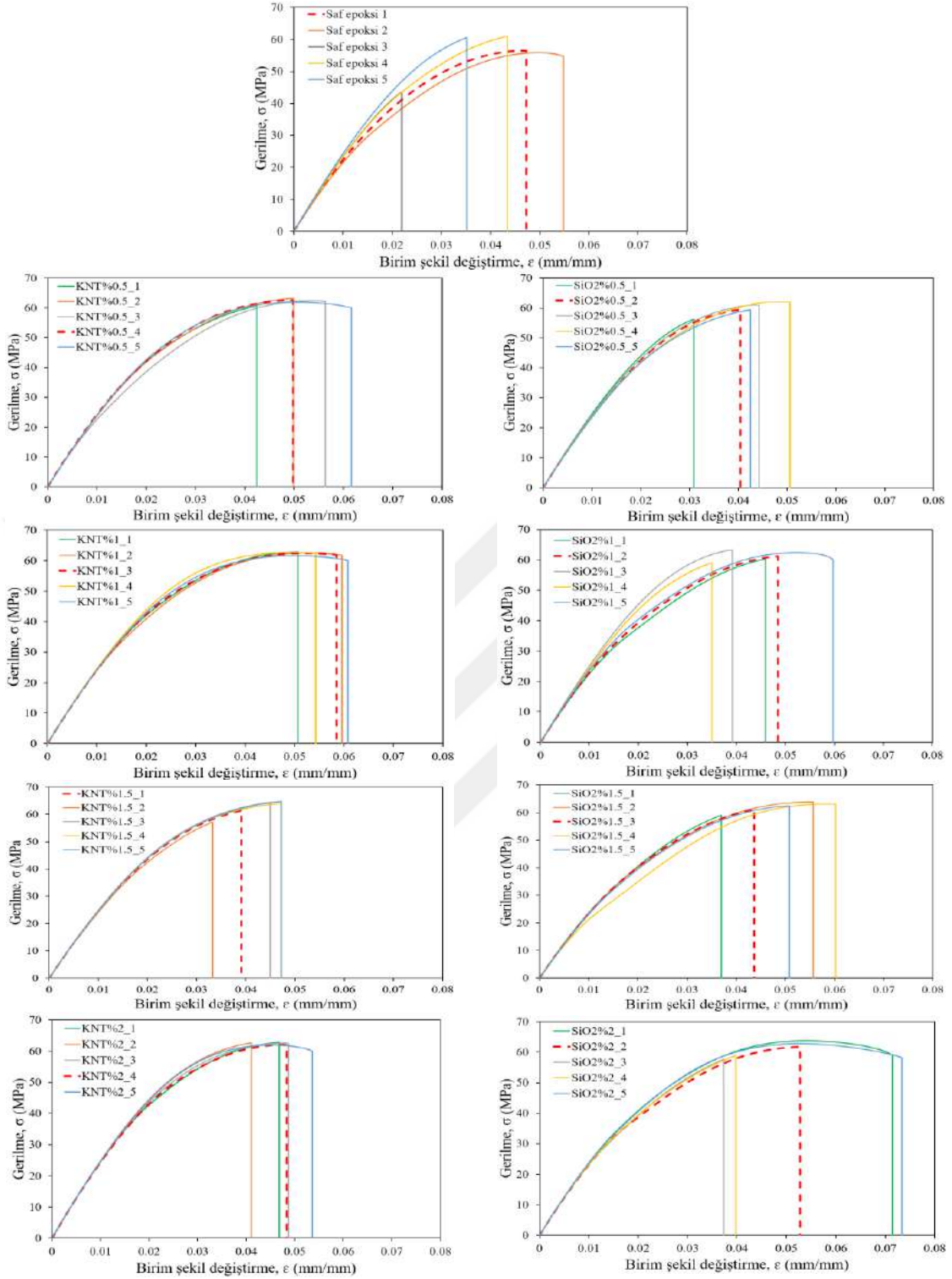
Şekil 5.6. Nanokompozitlerin Young Modülü değerleri

Epoksi nanokompozit yapılarda ilave edilen, nanopartikülün boyutu, şekli, dağılımı, yönlenmesi, çapraz bağ yoğunluğu, yapı içerisindeki üretimden kaynaklı hava boşlukları, nanopartikül/matris ara yüz bağı gibi etkiler mekanik özellikleri doğrudan etkilemektedir (Yazman, 2018).

Epoksi reçine içerisine homojen bir şekilde dağılmış rijit nanopartiküller genel olarak homojen gerilim dağılımına neden olarak, gerilim yığılmalarını azaltarak epoksi reçinenin mekanik özelliklerini iyileştirici özellik göstermektedir. Bununla birlikte, epoksi/nanopartikül arasında oluşan kuvvetli ara yüzey bağı, matristen daha rijit olan nanopartiküllere etkili bir yük transferine neden olarak mekanik özelliklerin artmasında önemli bir rol oynamaktadır.

Epoksi içerisine homojen bir şekilde karıştırılan nanopartiküllerin katalitik etkisi nedeni ile epoksinin kür kinetiği etkilenir ve epoksi matrisin çapraz bağ yoğunluğu artar, bu durum nanopartiküller ile epoksinin fonksiyonel grupları arasında etkileşimi artırıcı bir özellik sergiler. Epoksi reçine içerisine ilave edilen ÇCKNT'ler çapraz bağlar arasında güçlendirme veya köprü görevi görerek mukavemeti arttırdığı söylenilebilir.

Epoksi reçine içerisine ilave edilen nanopartikül miktarının artmasıyla yapı içerisinde muhtemel nanopartikül topaklanması, epoksi yapıda gerilim yığılmalarını arttırmakta ve aynı zamanda yapı içerisinde nanopartikül topaklanması yüzey alanını düşürerek matris ile etkileşimini düşürerek daha zayıf ara yüz bağı oluşmasına neden olmaktadır. Sonuç olarak bu durum mekanik özelliklerin düşmesine neden olmaktadır. Deneysel çalışmalar sonucunda, ÇCKNT ilaveli numunelerde %1 ve SiO₂ ilaveli numunelerde %1.5 ilave oranına kadar genel olarak mekanik özelliklerde artış oluşurken bu ilave oranlarından sonra özelliklerin düşüş eğilimine girmesi, ilave oranının artmasıyla birlikte yapı içerisinde oluşan nanopartikül topaklanması veya muhtemel homojen olmayan dağılımdan kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 5.7. Epoksi numunelerin tekrarlanabilirliğine dair değerler

Şekil 5.7 incelendiğinde, genel olarak yapı içerisinde homojen olarak dağıtılan nanopartiküllerin epoksi matrisin kararlılığını iyileştirdiği görülmektedir. Fakat ilave oranının artmasıyla nanopartiküllerin homojen olarak dağıtılamaması veya toplanması yapının kararlılığına olumsuz yönde etki yapmıştır.

Çizelge 5.1. Saf epoksi ve SiO₂ nanopartikül ilaveli mumunelerin mekanik özellikleri ve saf epoksiye göre değişim oranları

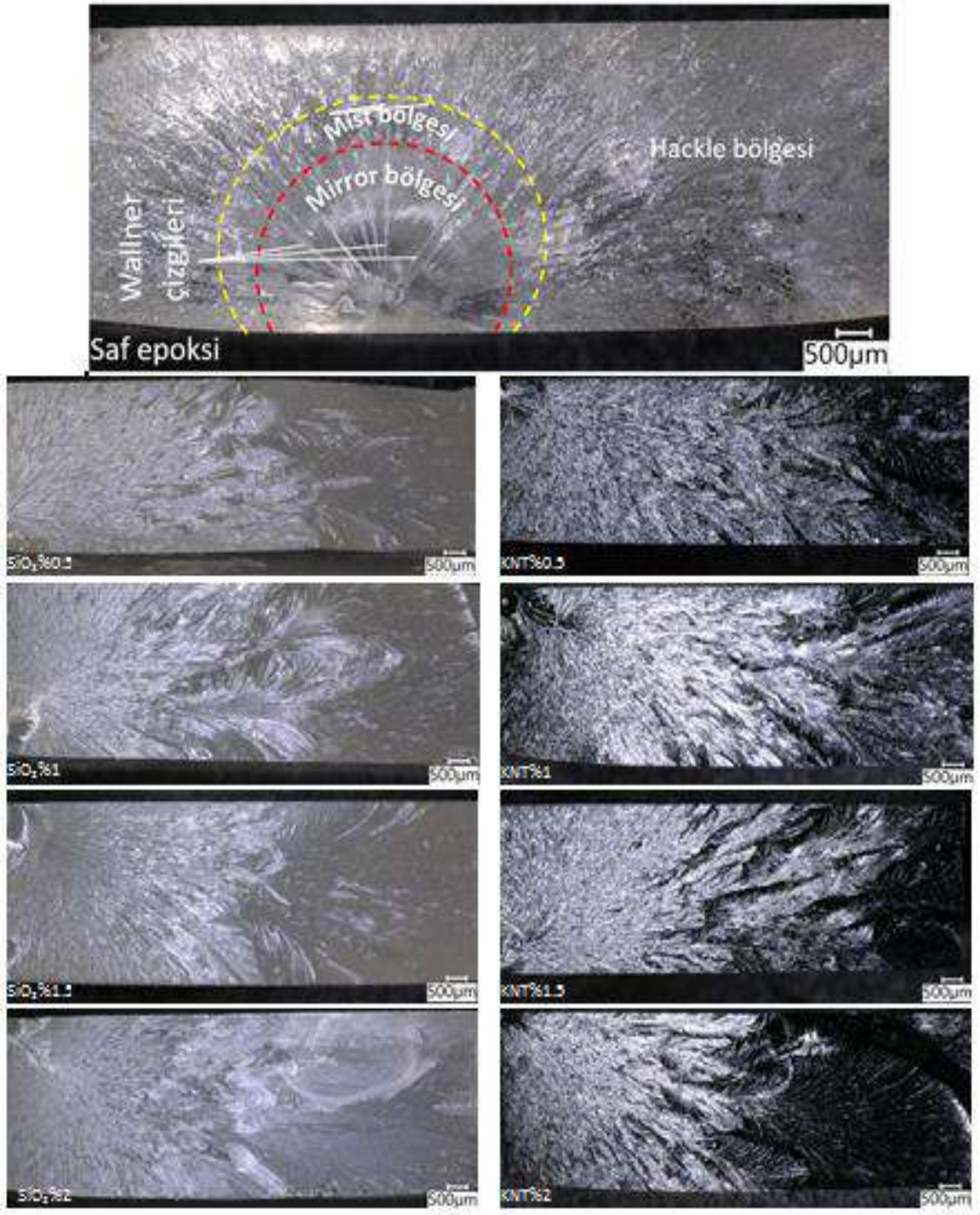
Numune	Deney sonuçları				Saf epoksiye göre değişim oranları (%)			
	σ_{Max} (MPa)	ϵ (%)	Statik tokluk (kJ/m ³)	E_c (GPa)	σ_{Max}	ϵ	Statik tokluk	E_c
Saf epoksi	55.47±7.04	4.06±1.27	1489.8±619.06	2.09	-	-	-	-
SiO ₂ _%0.5	59.55±2.23	4.16±0.71	1631.4±411.34	2.36	7.35	2.46	9.50	12.91
SiO ₂ _%1	61.25±1.70	4.56±0.95	1841.6±533.91	2.30	10.42	12.31	23.61	10.04
SiO₂_%1.5*	61.87±1.89	4.94±0.92	2026.4±525.12	2.46	11.53	21.67	36.01	17.70
SiO ₂ _%2	60.93±2.60	5.48±1.70	2385.4±1073.8	2.33	9.84	34.97	60.11	11.48

Çizelge 5.2. Saf epoksi ve KNT ilaveli mumunelerin mekanik özellikleri ve saf epoksiye göre değişim oranları

Numune	Deney sonuçları				Saf epoksiye göre değişim oranları (%)			
	σ_{Max} (Mpa)	ϵ (%)	Statik tokluk (kJ/m ³)	E_c (Gpa)	σ_{Max}	ϵ	Statik tokluk	E_c
Saf epoksi	55.47±7.04	4.06±1.27	1489.8±619.06	2.09	-	-	-	-
KNT_%0.5	62.18±0.94	5.19±0.72	2235.6±442.47	2.37	12.09	27.83	50.06	13.39
KNT_%1*	62.46±0.46	5.67±0.41	2565.8±248.98	2.36	12.60	39.65	72.22	12.91
KNT_%1.5	62.32±3.17	4.23±0.60	1721.4±391.98	2.36	12.34	4.18	15.54	12.91
KNT_%2	62.35±0.38	4.76±0.45	2036.2±273.60	2.38	12.40	17.24	36.67	13.87

5.2. Nanokompozitlerin Hasar Analizi

Saf epoksi, KNT ve SiO₂ nanopartikül ilaveli kompozitlerin çekme testleri sonucunda oluşan kırılma yüzeylerinin optik mikroskop aracılığıyla alınmış görüntüleri Şekil 5.8' de verilmiştir. Çekme deneyi sonucunda termoset polimerlerin kırılma yüzeylerinde genel olarak üç farklı bölge oluşmaktadır. Termoset polimerde kırılma esnasında çatlak önce yavaş olarak büyürken sonrasında hızlanarak pürüzsüz denebilecek ayna (mirror) olarak adlandırılan bir bölge oluşturur. Ardından bir geçiş bölgesi olan ayna bölgesine göre biraz daha pürüzlü olan bulanık "mist" denilen kısım meydana gelir. Devamındaysa çatlakın ilerleme hızının en üst seviyeye ulaştığı, diğer iki bölgeye göre çok daha pürüzlü olan çatlaklardaki enerji yığılmalarının çatallaşma biçiminde dağıldığı çentik "hackle" bölgesi adı verilen alan mist bölgenin etrafını çevrelemektedir (Goyat ve ark, 2015).

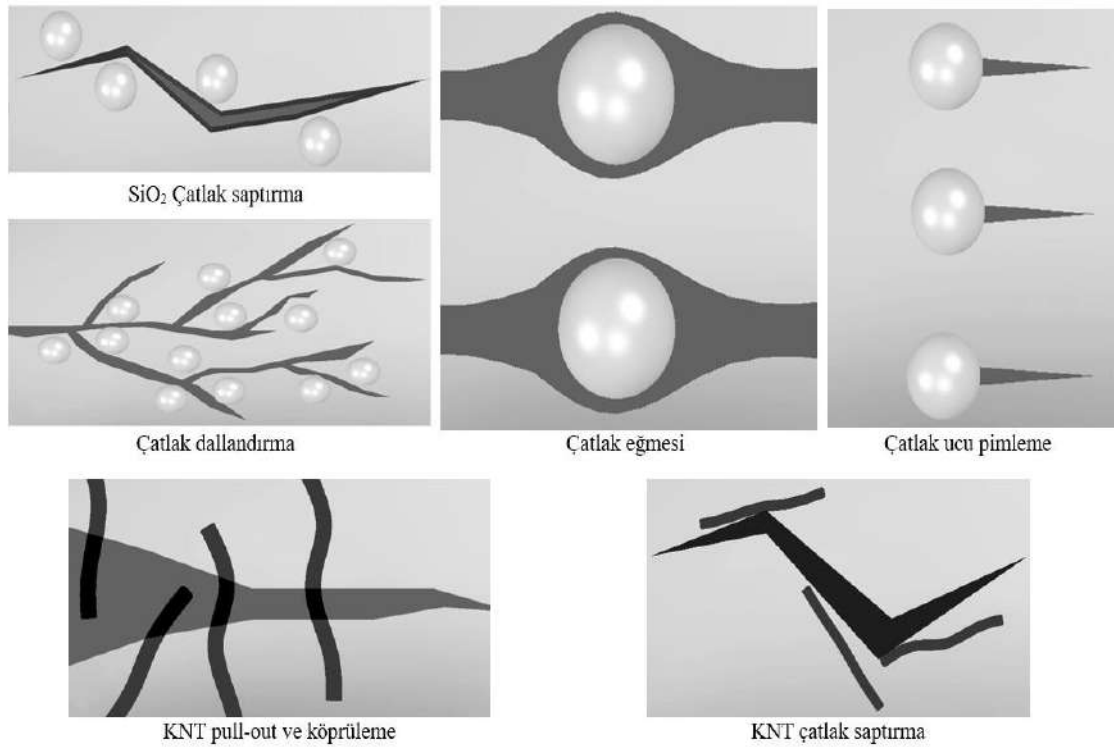


Şekil 5.8. Saf ve nanopartikül ilaveli epoksi numunelerin hasar yüzeyleri

Şekil 5.8’ de gösterilen hasar yüzeylerinde saf epoksinin ayna (mirror) bölgesinin geniş bir bölge kapladığını görmekteyiz. SiO₂ takviyesinin %1.5 ve %2 olduğu numunelerin de ayna bölgesi saf numuneye benzer ve geniş bir yer kaplarken %1 ve %0.5 olan numunelerde dar bir alan kaplamaktadır. KNT ilaveli numunelerdeyse ayna bölgesi genel olarak dar bir alan kaplamaktadır. Bulanık (Mist) bölgeler içinse net

bir ayırım söz konusu değildir. Çentik bölgelerine baktığımızdaysa en az pürüzsüzlüğün %2 KNT ve SiO₂ ilaveli numunelerde gerçekleştiren, %0.5, 1, 1.5 KNT ve SiO₂ ilaveli numunelerde saf numuneye kıyasla yüzeyin daha pürüzlü gerçekleştiği görülmektedir. Ayrıca nehir (wallner) çizgilerinin kırılma boyunca oluştuğu ve nehir (wallner) çizgilerinin saf numunede görülmeyen bir biçimde dallandığı görülmektedir. Bölge pürüzlülükleri, genişlikleri ve hasar yön çizgilerinin dallanmasının nanopartikül ilavesinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

Epoksi reçine içerisine ilave edilen rijit nanopartiküller pull-out, çatlak saptırma, köprüleme, kayma bantları, plastik deformasyon ve çatlak ucu pimleme, çatlak eğilmesi gibi tokluk artırma mekanizmalarına neden olmaktadır (Ghadami ve ark., 2016; Gojny ve ark., 2005; Goyat ve ark., 2015; Sharmila ve ark., 2016; Subhani ve ark., 2015). Çekme deneyi sonucunda literatürde epoksi reçinenin hasar yüzeylerinde görülen tokluk artırma mekanizmalarının şematik görünümü Şekil 5.9'da verilmiştir.



Şekil 5.9. Tokluk artırma mekanizmaları

5.3. Tabakalı Kompozitlerin Mekanik Özellikleri

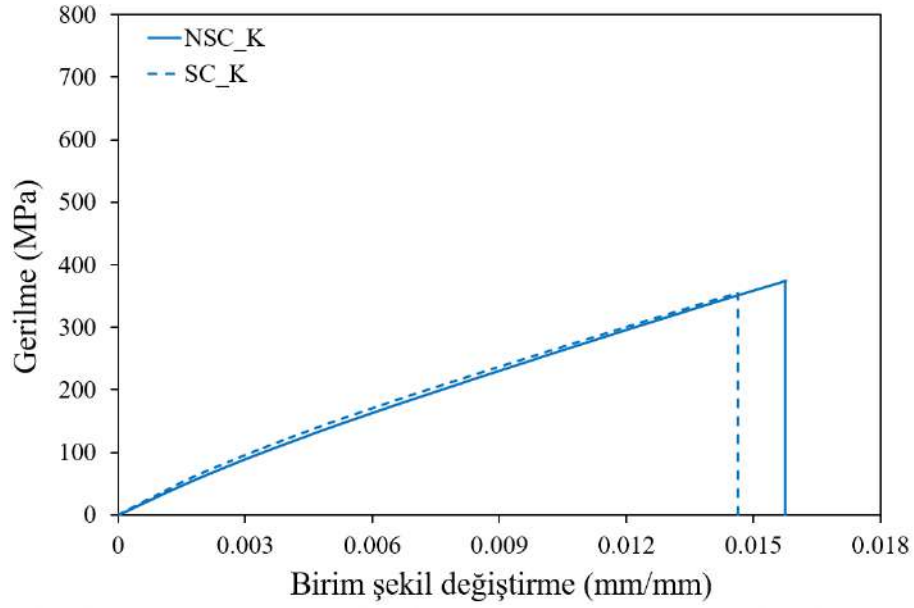
5.3.1. Tabakalı kompozit plakaların çekme testi

Çekme testi için kesilen numuneler Şekil 5.10'daki Shimadzu (100 kN) marka test cihazı ile ASTM D3039 standardına uygun olarak, oda sıcaklığında ve 2 mm/dak.'lık çekme hızında gerçekleştirilmiştir. Çekme testi, her numune tipi için 3 kez tekrarlanmış olup ortalama değer çekme dayanımı olarak kabul edilmiştir.



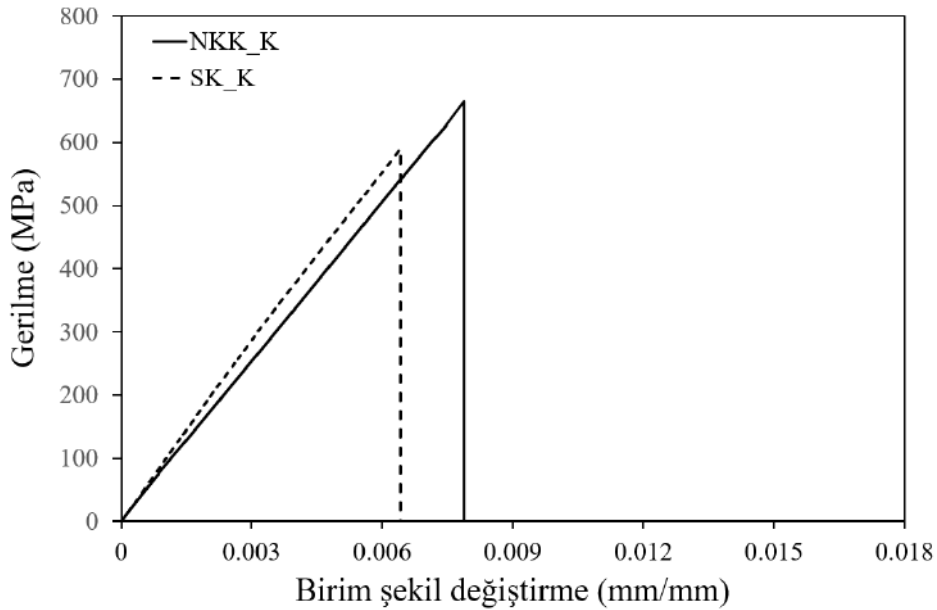
Şekil 5.10. Çekme deneyi

Tabakalı kompozit numunelerin çekme testleri sonucu elde edilen gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri Şekil 5.11, Şekil 5.12 ve Şekil 5.13'te verilmiştir. Uygulanan çekme deneyi sonucu elde edilen max. gerilme, yüzde uzama, statik tokluk ve Young Modülü değerleri karşılaştırmalı bir şekilde Şekil 5.14, Şekil 5.15, Şekil 5.16 ve Şekil 5.17'de verilmiştir. Tabakalı kompozitlerde 3 tekrarlı çekme deneyi sonrası her bir numune için tekrarlanabilirliği gösteren grafikler Şekil 5.19'da verilmiştir. Bununla birlikte deney sonrası elde edilen mekanik özelliklerin sayısal değerlerinin sonuçları daha iyi analiz etmek amacıyla ayrıca Çizelge 5.3' de verilmiştir. Deney sonrası numuneler üzerinde hasar analizi yapılmış ve hasar modları belirlenmiştir.



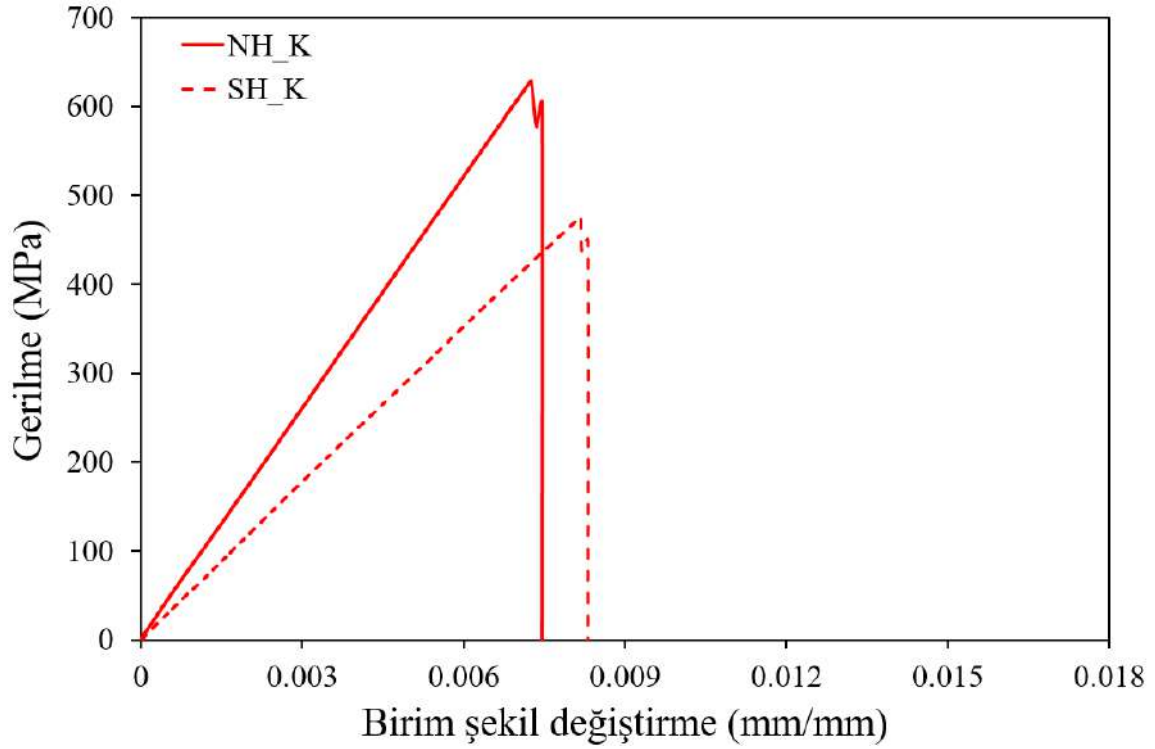
Şekil 5.11. Nano SiO₂ takviyeli ve saf epoksili tabakalı kompozitlerin çekme gerilmesi-birim şekil değiştirme grafiği

Çekme dayanımı bakımından %1.5 SiO₂ takviyeli numunede %2.5'lik bir artış olmuştur yani SiO₂ takviyesi belirgin bir artış sağlayamamış neredeyse saf numuneyle benzer bir sonuç vermiştir. Literatürde tek yönlü cam elyafa eklenen %5 lik nano SiO₂ takviyesi çekme dayanımında %23 lük bir artış sağlamıştır (Zheng ve ark., 2005). Buradan hareketle 0°/90°'nin aksine tek yönlü elyafın nano modifiyesiyle çekme dayanımına daha olumlu etki sağladığı söylenebilir.



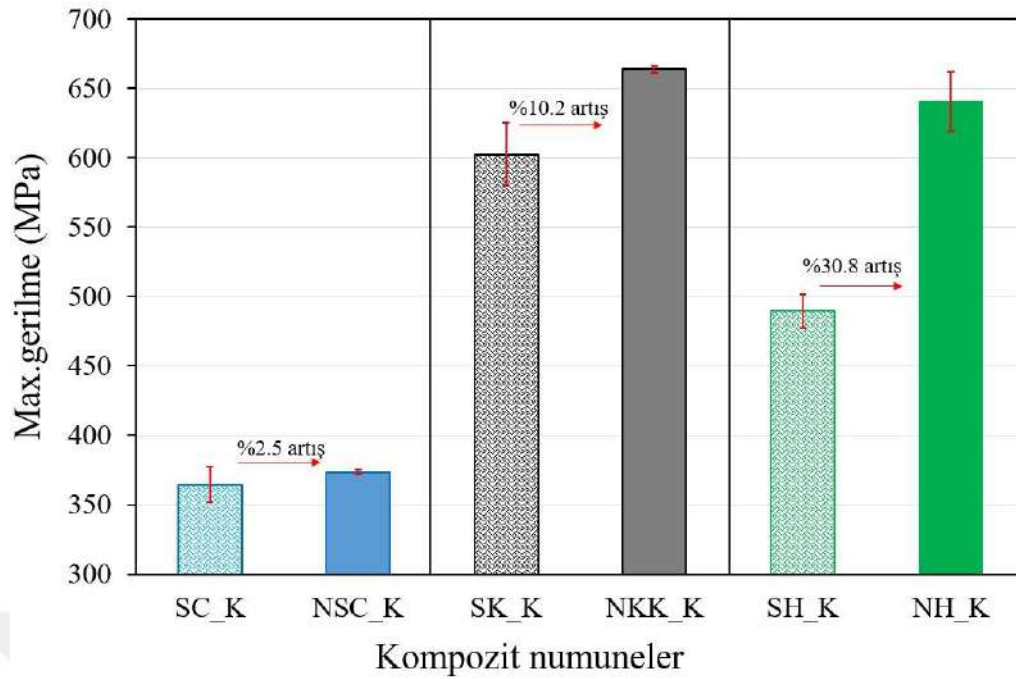
Şekil 5.12. KNT takviyeli ve saf epoksili tabakalı kompozitlerin çekme gerilmesi-birim şekil değiştirme grafiği

En yüksek çekme mukavemeti açısından incelendiğinde, saf epoksiye göre %1 KNT takviyeli numunede %10.2 oranında bir artış elde edilmiştir. Literatürde de benzer bir çalışmada %2 KNT takviyeli numune saf epoksili numuneye göre çekme dayanımında %5'lik bir artış sağlamıştır (Abdelal ve ark., 2018).

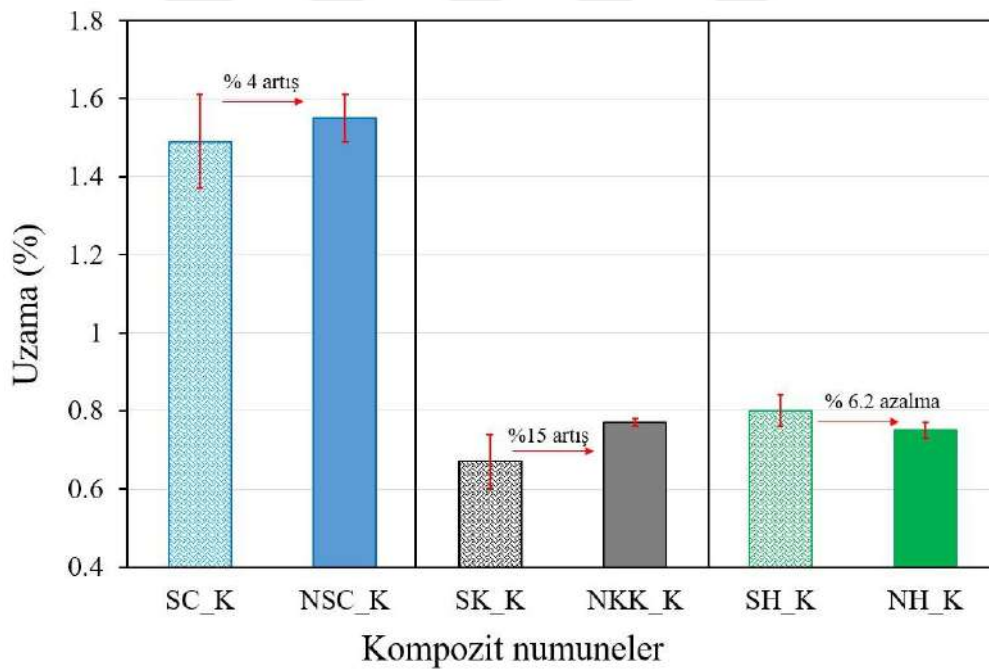


Şekil 5.13. Nano hibrit takviyeli ve saf epoksili tabakalı kompozitlerin çekme gerilmesi-birim şekil değiştirme grafiği

Çekme mukavemetindeki en iyi artışı saf epoksiye göre %30.8 artış ile nano hibrit takviyeli numune vermiştir. Nanopartikülün bu bağlamda matrisi modifiye ederek hibrit elyaf takviyeli tabakalı kompozitin de matrisini iyileştirmiş ve çekme mukavemetinin iyileşmesine yardımcı olmuştur. Çekme mukavemeti açısından elde edilen iyileştirmenin istenilen homojen dağılımın sağlanmış olması, matris/nanopartikül arayüzünün daha kuvvetli olması hibrit nanopartikülünün çapraz bağ yoğunluğunu artıracak bir etki göstermesi ile iyileştirmenin sağlandığı söylenebilir. Tokluk değerinde de %23'lük bir artış gösteren hibrit nano takviyeli numune, yüzde uzama değerinde saf epoksiye göre %6.2'lik bir düşüş göstermiştir.

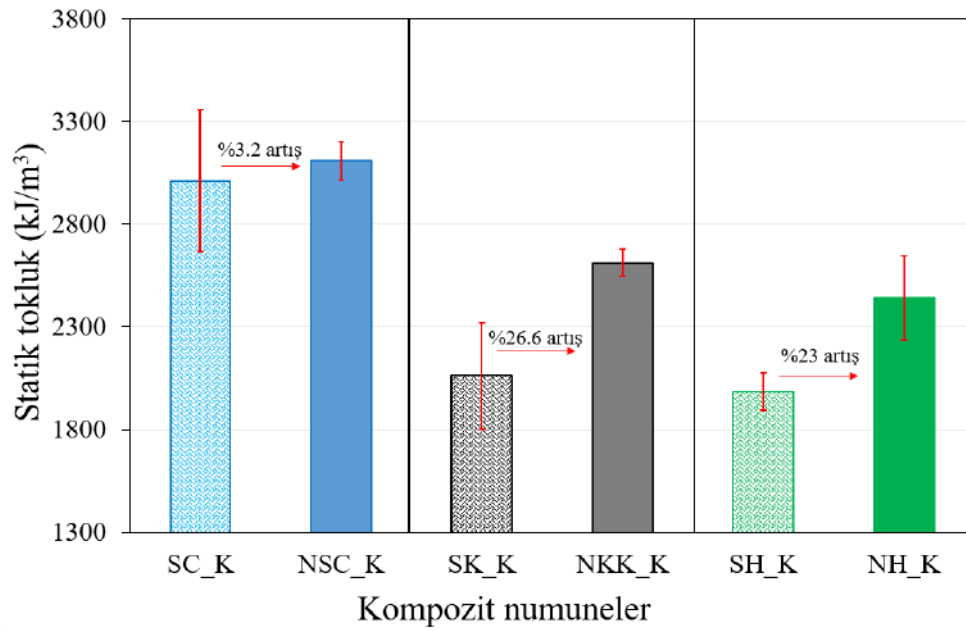


Şekil 5.14. Tabakalı kompozitlerin çekme mukavemeti değerleri



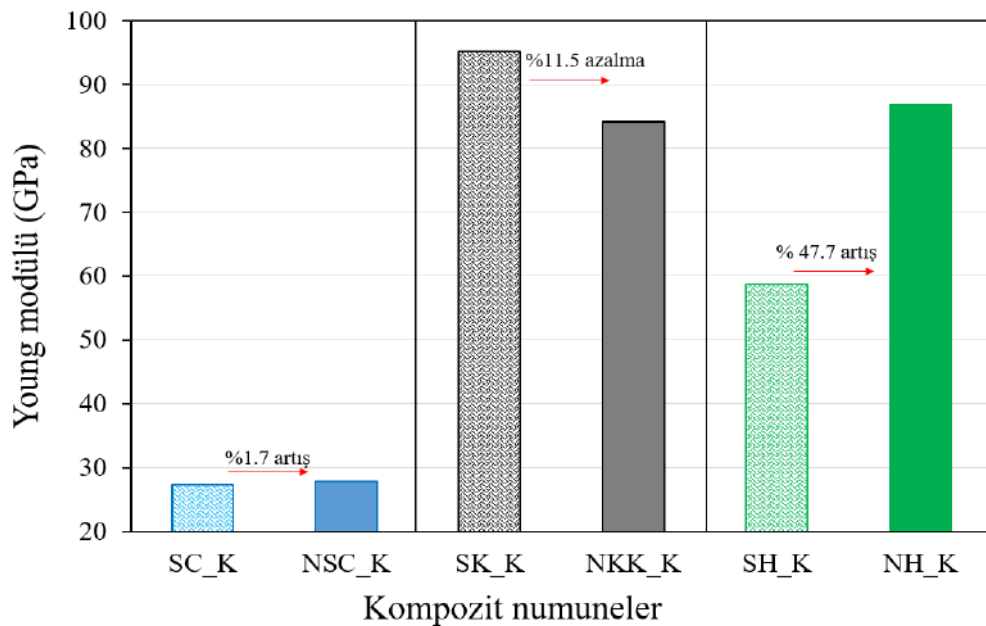
Şekil 5.15. Tabakalı kompozitlerin çekme uzaması değerleri

Çekme uzaması bakımından incelendiğinde; saf epoksiye göre en iyi sonuç %15'lik artış ile %1 KNT nanopartikül ilaveli kompozit numunesinden elde edilmiştir. Nano hibrit takviyeli numune %6.2'artış gösterirken çekme dayanımında olduğu gibi en düşük artış %1.5 SiO₂ nanopartikül takviyeli numunede gözlemlenmiştir.



Şekil 5.16. Tabakalı kompozitlerin tokluk değerleri

Statik tokluk değerleri açısından incelendiğinde ise saf epoksiye göre en iyi sonuç %26.6 artış ile %1 KNT nanopartikül ilaveli kompozit numunesinden elde edilmiştir. Literatürde benzer bir çalışmada %2 KNT ilavesi tokluğu %8 arttırmıştır (Abdelal ve ark., 2018). Saf epoksiye göre %23 artışla nano hibrit takviyeli numunede görülmüştür. Çekme dayanımı ve birim şekil değişiminde olduğu gibi %1.5 SiO₂ nanopartikül takviteli numune saf epoksiye göre %3.2 tokluk artışı göstererek en düşük sonucu vermiştir.

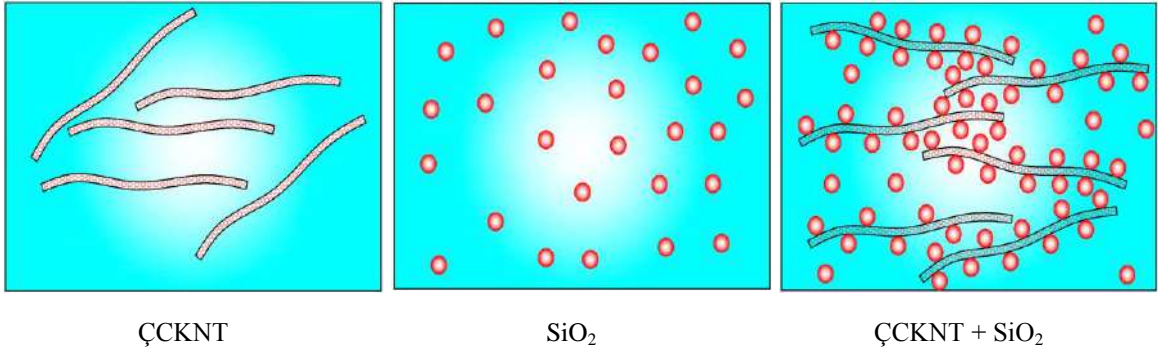


Şekil 5.17. Tabakalı kompozitlerin Young Modülü değerleri

Nanopartikül ilavesi ile elyaf takviyeli kompozitlerin artan mekanik özellikleri, makro ve nano takviyeler arasındaki sinerjiye bağlıdır. Bu sinerjik etkileri şu şekilde sıralamak mümkündür: Nanopartikül ilavesi ile fiber ve matris arasında artan sürtünme kuvvetleri ve mekanik kitlemeden kaynaklanan daha yüksek arayüzey yapışması nedeniyle, nano modifiye arayüzler aracılığıyla etkili gerilim aktarımı. Nanopartikül ilavesi ile fiberlerin daha yüksek yüzey alanı, artan ısı gerilmeler, fiber ve nanopartiküller arasında kimyasal bağ ve arayüzler boyunca çatlak yayılmasını kısıtlayan nanopartiküller nedeniyle daha kuvvetli arayüz bölgeleri (Godara ve ark. 2010; Rana ve ark., 2011; Asadi ve ark., 2016). Aynı zamanda belirtilen sinerjik etkilerin yanısıra, nanopartikül ilaveli fiber takviyeli kompozitlerin mekanik özelliklerinin artması, matris içerisindeki nanopartiküllerin ilave olarak yapı içerisinde tokluk/enerji dağıtma mekanizmalarının da (pull-out, çatlak saptırma, köprüleme, kayma bantları, plastik deformasyon ve çatlak ucu pimleme, çatlak eğilmesi) etkili olduğu düşünülmektedir.

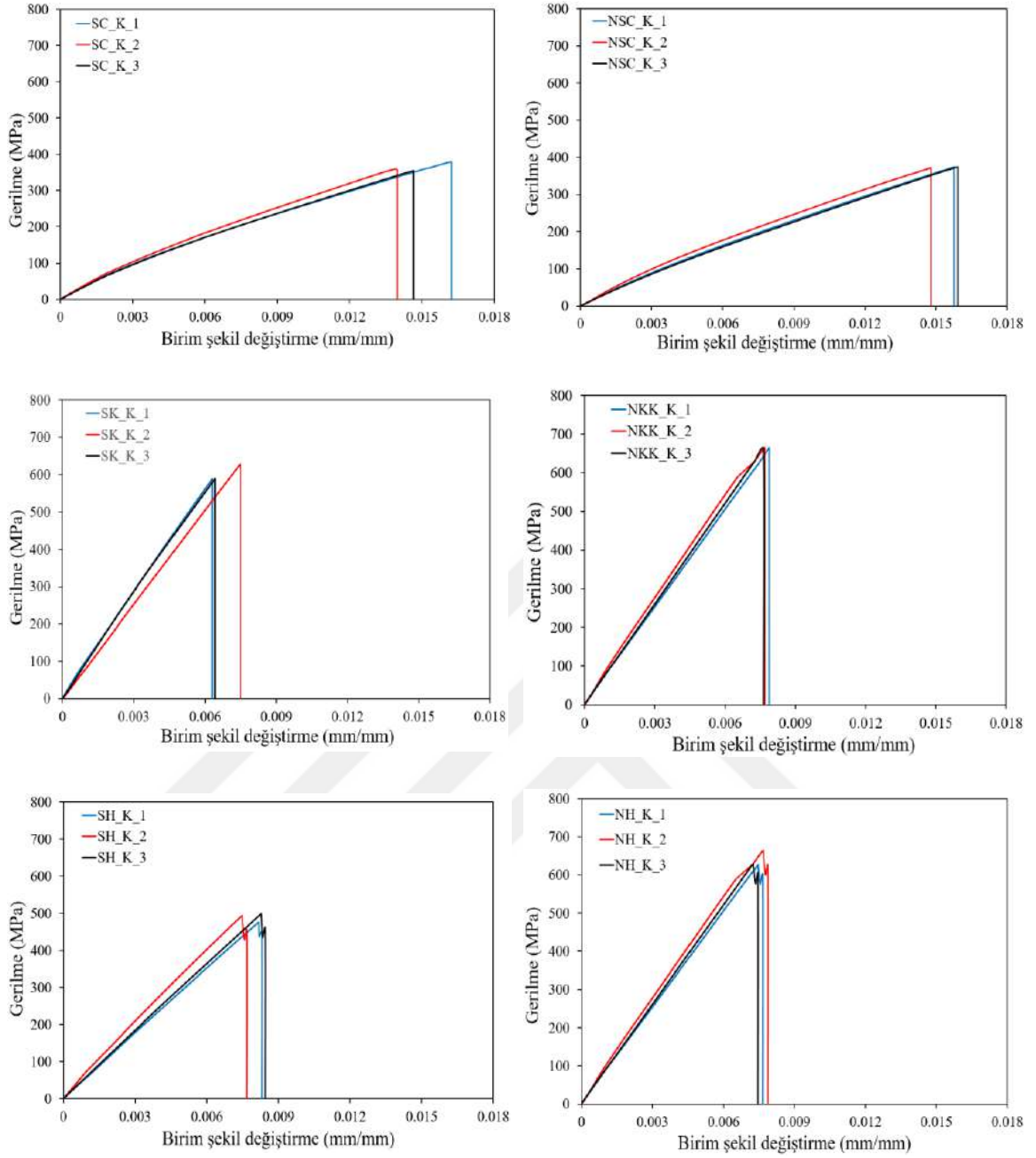
Yapılan mevcut çalışmada, SiO_2 ve KNT ilavesi nedeniyle cam ve karbon elyafları ve epoksi matris arasında daha güçlü bir arayüzey yapışması gözlenmiş ve arayüzey bağının artması ile yapı içerisinde etkili bir gerilme dağılımı sonucu daha yüksek mekanik özelliklerin elde edilmesine neden olmuştur. Deneysel sonuçlar incelendiğinde KNT nanopartiküllerle karbon elyaf arasında daha etkili sinerjik etkinin olduğu görülmüştür. Aynı zamanda KNT ilaveli epoksi matris numunelerin mekanik özelliklerinin SiO_2 ilaveli epoksi matristen daha yüksek olması da (Şekil 5.3- Şekil 5.6) KNT ilaveli karbon elyaf kompozitlerin mekanik özelliklerindeki artışta önemli rol oynamıştır. Bununla birlikte, hibrit (karbon/cam) kompozit numunelerde SiO_2 ve KNT'lerin birlikte ilave edilmesi özellikle gerilme değerlerini önemli ölçüde arttırmıştır. Hibrit kompozit yapı içerisine ilave edilen yine hibrit nanopartikül ilavesi yukarıda bahsedilen sinerjik etkiyi oldukça arttırmıştır.

ÇCKNT'lerin ve SiO_2 'lerin fiber takviyeli kompozit matrisine homojen bir şekilde dağıtılması ile ÇCKNT'ler, SiO_2 'lerin yüksek yüzeyleri tarafından Van der Waals kuvvetleri aracılığıyla çekilir. Dolayısıyla, ÇCKNT'ler SiO_2 nanopartiküllerin alanına yaklaşır ve genellikle SiO_2 nanopartiküllerin yüzeylerine sabitlendikleri veya SiO_2 nanopartiküller arasına nüfuz ettikleri söylenilebilir (Şekil 5.18).



Şekil 5.18. Nanopartiküllerin ayrı ayrı ve birlikte matris içerisinde şematik olarak gösterimi

İki farklı şekil ve boyuttaki nanopartiküllerin, tek tek nanopartikül dağılımına göre daha geniş yüzey alanına sahip üç boyutlu yapıların oluşmasına yol açar. Sonuç olarak, üç boyutlu hibritler ve epoksi matris arasındaki temas yüzeyi alanı artar ve bu da matris ile daha etkili arayüz bağı oluşturmasına neden olur. Polimer zincirine daha iyi gömülebilen bu hibrit yapı ile matris arasında daha iyi bir etkileşimle sonuçlanan kompozit içinde dokunaçlar olarak hareket eder. Bahsedilen bu hibrit nano yapı, elyaf ve matris arasındaki arayüzü geliştirerek daha etkili bir gerilme transferine neden olur. Bununla birlikte, matris içerisinde oluşan hibrit nano yapı toklaşma mekanizmalarını birleştirme eğilimine sahiptir ve bu da mekanik özelliklerinin daha da artmasına yol açar.



Şekil 5.19. Tabakalı kompozitlerin çekme deneyi değerlerinin tekrarlanabilirliği

Şekil 5.19'deki grafiklerde görüldüğü üzere numunelerin tekrarlanabilirlik değeri oldukça iyi sonuç vermiştir bunun nedeni olarak üretimin kalitesi nanopartiküllerin matris içinde homojen dağılmış olması olarak düşünülebilir.

Çizelge 5.3. Nano SiO₂ ve KNT takviyeli tabakalı kompozitlerin mekanik özelliklerinin saf epoksili tabakalı kompozitlere göre değişimi

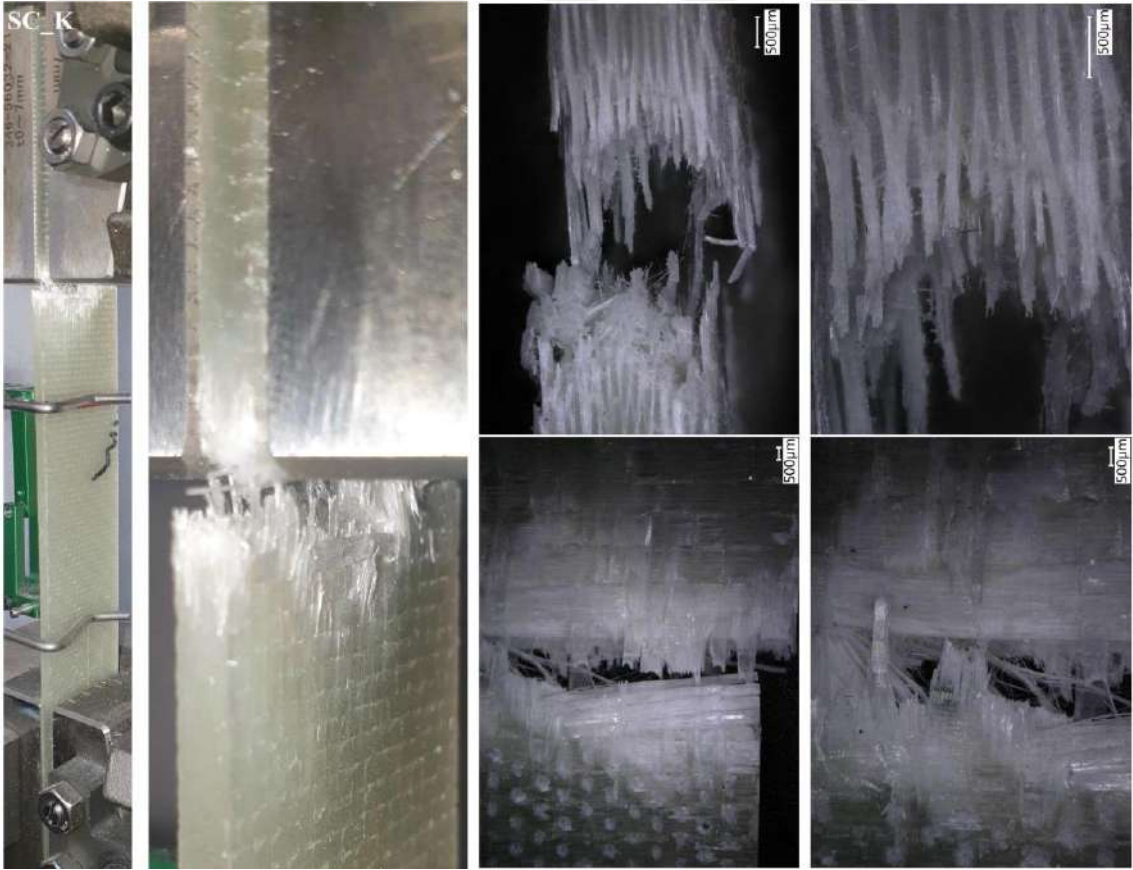
Çekme deney sonuçları				
Numune Kodu	σ_{Max} (MPa)	ϵ (%)	Statik tokluk (kJ/m ³)	Eç (GPa)
SC_K	364.38±12.8	1.49±0.12	3012 ±344	27.39
SK_K	602.44±22.6	0.67±0.07	2062±258	95.08
SH_K	489.64±12.2	0.80±0.04	1985±91	58.78
NSC_K	373.47±1.58	1.55±0.06	3108±92	27.86
NKK_K	663.73±2.68	0.77±0.01	2612±68	84.14
NH_K	640.52±21.46	0.75±0.02	2440±205	86.81

5.3.2. Tabakalı kompozit plakaların çekme testi sonrası hasar analizi

Kompozit malzemelerle ilgili yapılan çalışmalarda deney sonrası oluşan hasarların incelenmesi ve hasar modlarının belirlenmesi sonraki yapılacak çalışmalar için önemlidir (Aksoylu ve ark., 2020; Gemi ve ark., 2018; 2018; 2019; Tarakçioğlu ve ark., 2005). Yapılan hasar analizleri neticesinde üretilen kompozit yapının hasar davranışları belirlenmelidir. Yapılacak sonraki çalışmalar için seçilecek kompozit bileşenlerinin iyileştirmesi yönünde; çalışmayı yapan ve literatürde benzer çalışmayı yapacak araştırmacılara önemli katkılar sağlayacağını düşündüğümüz için geniş bir makro ve mikro hasar analizi yapılmıştır. Deney esnasında ve deney sonrasında alınan veriler ışığında yapılan hasar analizi ile cam, karbon, hibrit ve nano takviyeli kompozitlerin bileşenlerinin etkileri karşılaştırılmalı olarak yorumlanmıştır. Ağırlıklı olarak hibritasyon ve nano takviyesinin hasarın gelişimine etkileri hem çekme deneyleri hemde üç nokta eğme deneyleri için incelenmiştir.

Çekme testleri öncesinde standartlara göre hazırlanmış numunelere, çekme esnasında ve çekme sonrasında iyi bir hasar analizi yapılabilmesi için yan yüzeyleri kademeli olarak zımparalama işlemine tabi tutulmuştur. Yapılan hasar analizleri, deney esnasında alınan kayıtlar ve deney sonrasında yapılan mikroskobik görseller dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir (Gemi ve ark., 2020; 2020; Gemi., 2018). Analizlerin sıralaması, saf numuneler ve nano takviyeli numuneler arka arkaya verilmiş, bölüm 5.3’de verilen çekme testi esnasında elde edilen sonuçlar ile oluşturulmuş karşılaştırmalı grafikler dikkate alınarak yapılmıştır.

Şekil 5.20, Şekil 5.21, Şekil 5.11 ve Çizelge 5.3 birlikte incelendiğinde; saf cam kompozit (SC_K) numunelerde çekme bölgesinde oluşan hasarların geniş bir alanda oluştuğu ve tabakalarda gerçekleşen kopmaların düzenli ve nano takviyeli numunelere (NSC_K) göre daha sünek bir davranış sergilediği görülmüştür. Çekme çenesine yakın bir bölgede gerçekleşen hasarlar yakından incelendiğinde, $0^\circ/90^\circ$ kumaş ile üretilmiş olan numunelerde 0° elyaf demetlerinin kopma sonrasında tabakalarda pul-out şeklinde hasarların oluştuğu görülmüştür. Uygulanan yük 364.38 MPa maksimum gerilme seviyesine yaklaştığında numunede matris çatlak sesleri gelmeye başlamış ve 90° elyaf demetlerinde elyaf doğrultusunda debonding hasarları neticesinde matris çatlakları gerçekleşmiştir. 90° elyaf demetleri doğrultusunda oluşan kopmada bu elyaf demetlerinin mukavemete katkısının olmadığı anlaşılmıştır (Morkavuk ve ark., 2018).



Şekil 5.20. Saf cam (SC_K) test numunesinin çekme testi sonrası hasar görüntüleri

Nano takviyeli cam (NSC_K) numunelerde oluşan hasar görselleri Şekil 5.21’de verilmiştir. Saf cam numune ile karşılaştırıldığında 373.47 MPa gerilme ve 3108 kJ/m^3 statik tokluk değerlerinin yüksek çıkması SiO_2 nano takviyesinin kompozit

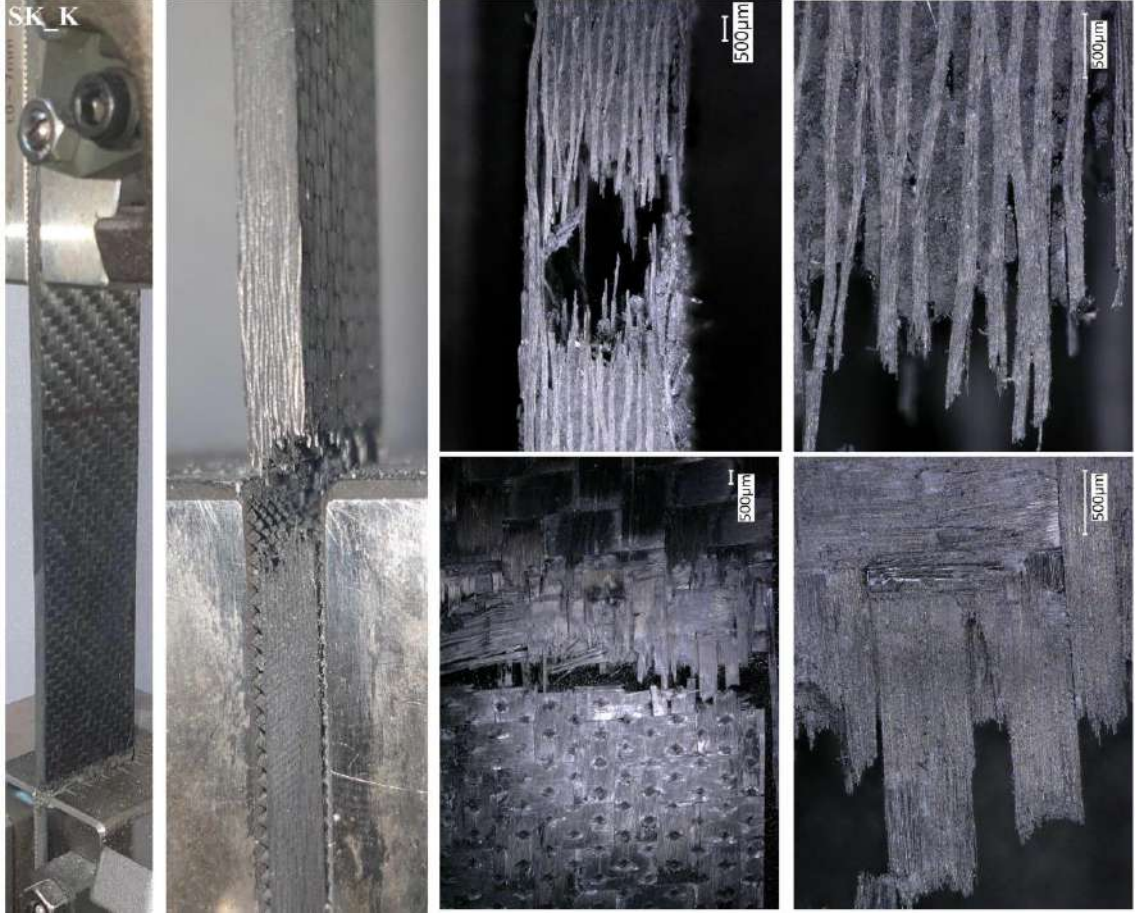
bileşenlerinden reçineyi modifiye ettiği anlaşılmaktadır. Şekil 5.21’de verilen kesit görüntülerinde hasarın yaklaşık 45° bir açı ile kırılması, statik tokluğun artışı ile matris yapının gevrek bir davranış sergilemesine, delaminasyon hasarının azalmasına ve tabaka kırılmalarının düzensiz bir şekilde gerçekleşmesine sebep olmuştur.



Şekil 5.21. Nano takviyeli cam (NSC_K) test numunesinin çekme testi sonrası hasar görüntüleri

Saf karbon kompozit (SK_K) test numunesinin çekme testi sonrası makro ve mikroskopik hasar görüntüleri Şekil 5.22’de verilmiştir. Karbon elyafın yapısı gereği 602.44 MPa gerilme ve 2062 kJ/m³ statik tokluk değerlerinde gevrek bir kırılma hasarı gösteren numune incelendiğinde, bu durum gerek genel hasar gerekse elyaf demetlerinde oluşan hasarda da görülmektedir. Dar bir alanda oluşan delaminasyon hasarı sonrasında kopan tabakalarda pull-out hasarlarında olduğu gözlenmiştir. Bu numunede oluşan birim şekil değiştirmenin az olmasından dolayı kopma seviyesine kadar matris çatlak seslerinin duyulmamıştır. Oluşan sonuç hasarı yıkımsal (catastrophic) şekilde gerçekleşmiştir. Şekil 5.23’de verilen ÇCKNT nanotüp takviyeli

karbon kompozit (NKK_K) test numunesinin çekme testi sonrası hasar görüntüleri incelendiğinde; saf karbon numunelere göre oldukça farklı bir hasar mekanizması sergilediği görülmüştür.



Şekil 5.22. Saf karbon kompozit (SK_K) test numunesinin çekme testi sonrası hasar görüntüleri

Deneysel veriler sonucunda elde edilen Şekil 5.11 ve Çizelge 5.3 incelendiğinde; saf karbon numunesine kıyasla nano takviyesinin maksimum gerilmeyi 663.73 MPa değerine, statik tokluğu 2612 kJ/m^3 seviyesine çıkartmakla beraber Young Modülünü 84.14 GPa değerine düşürdüğü görülmüştür. Bu durumu, Şekil 5.23’de verilen nano takviyeli karbon kompozit (NKK_K) test numunesinin çekme testi sonrası hasar görüntüleri incelendiğinde hasarın gelişimi ile de açıklamak mümkün olmuştur. Makro hasar görüntülerinde oluşan hasarın saf numuneye göre kıyaslandığında hem genel numune kesitinde hemde tabaka içi hasarlarda sünek bir kırılma davranış sergilediği görülmektedir. Mikro hasar görüntüleri yakından incelendiğinde, 90° elyaf demetlerinde oluşan matris hasarlarının tabakalar arasında geniş bir alanda oluştuğu ve tabakalar

arasında oluşan delaminasyon hasarlarının da tabaka doğrultusunda genişlediği görülmüştür. Bu durum, nano takviyesi ile matris yapının olumlu bir modifikasyon ile gevrek bir yapıya sahip olan karbon plakanın sünek bir hasar gelişimine imkân sağladığı görülmüştür. Oluşan delaminasyon hasarlarının geniş bir alanı kaplaması tabaka sıyrılma (pull-out) hasarlarının daha fazla oluşmasına sebep olmuştur.



Şekil 5.23. Nano takviyeli karbon kompozit (NKK_K) test numunesinin çekme testi sonrası hasar görüntüleri

Saf hibrit kompozit (SH_K) test numunesinin çekme testi sonrası hasar görüntüleri Şekil 5.24’de verilmiştir. Hibrit numunelerin çekme testi esnasında hasar gelişimi, maksimum gerilme seviyesinde (489.64 MPa) karbon tabakaların hasarı ile başlamış ve hemen akabinde cam tabakaların kopması ile sonuç hasarına ulaşmıştır. Şekil 5.19 ile birlikte incelendiğinde maksimum gerilme seviyesine kadar karbon ve cam tabakaların yükü birlikte taşıdığı karbon tabakaların hasarı ile yükte bir miktar düşüş gerçekleşmiştir. Kullanılan cam ve karbon elyafların modül farklılıklarından

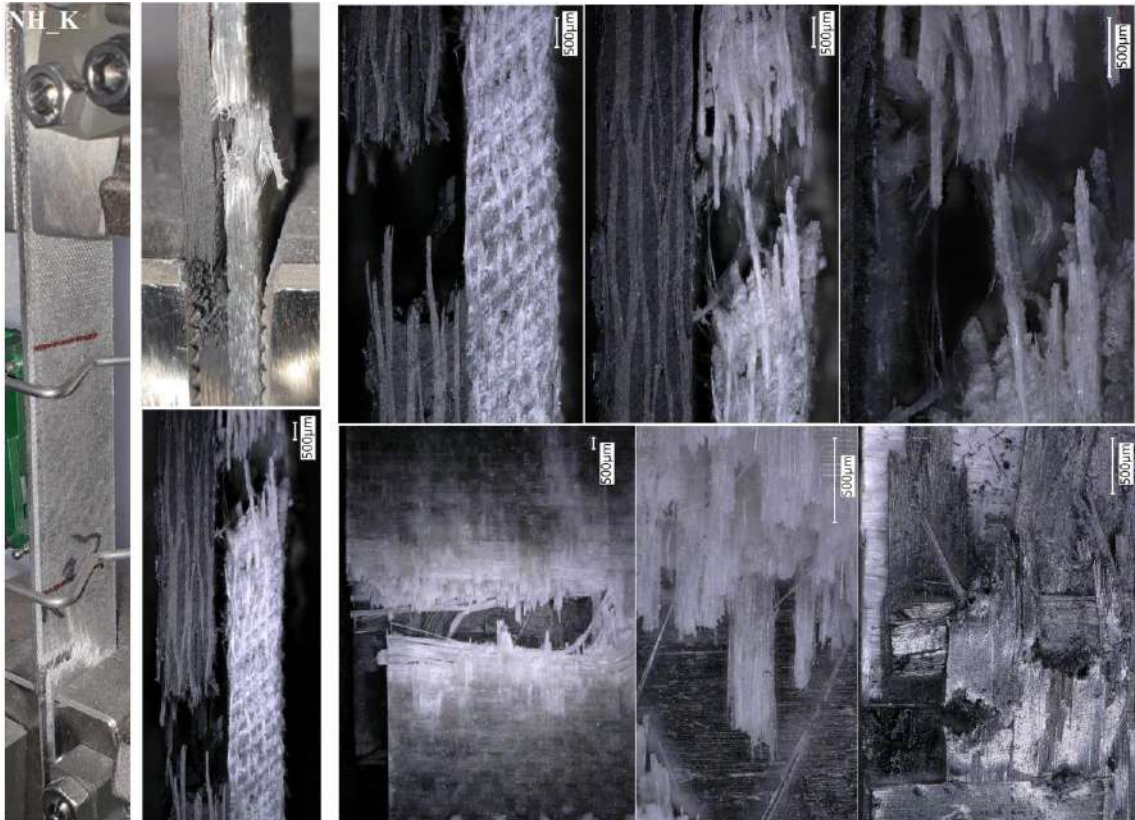
dolayı hasarın kademeli gerçekleşmesi kaçınılmaz olmuştur. Kısa bir deplasman artışı gerçekleştiikten sonra cam tabakalarda hasar görmüştür. Karbon tabakalarda gevrek bir kırılma gerçekleşirken cam tabakalar daha sünek bir hasar mekanizması ile hasara uğramıştır. Karbon tabakalarında kırılmanın etkisi ile elyaf demetlerinde parçalı bir kırılma oluşurken cam tabakalarda matris çatlakları ve yoğun delaminasyon hasarları gözlenmiştir.



Şekil 5.24. Saf hibrit kompozit (SH_K) test numunesinin çekme testi sonrası hasar görüntüleri

Nano takviyeli hibrit kompozit (NH_K) test numunesinin çekme testi sonrası hasar görüntüleri Şekil 5.25’de verilmiştir. Şekil 5.25 Şekil 5.19 ve Çizelge 5.3 ile birlikte incelendiğinde nano takviyesinin bütün mekanik sonuçları olumlu yönde etkilediği görülmüştür. Saf hibrit numuneler (SH_K) ile karşılaştırıldığında maksimum gerilmenin 640.52 MPa, Statik tokluğun 2440 kJ/m³ ve Young modülünün 86.81 GPa gibi yüksek değerlere çıktığı görülmüştür. Hasar davranışı açısından incelendiğinde; maksimum gerilme seviyesine gelindiğinde saf numunelerde de olduğu gibi önce karbon tabakalarda hasar gerçekleşmiş, yükte ani bir düşüş gerçekleşmesi ile ilerleyen

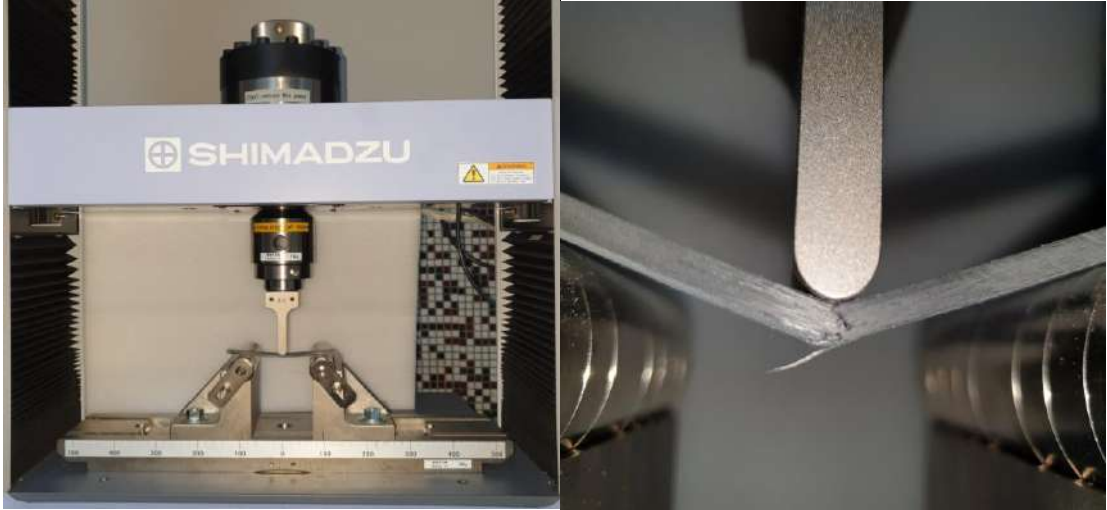
deplasman değerlerinde cam tabakada da hasar oluşmuştur. Oluşan hasar bölgeleri incelendiğinde; karbon ve cam tabakaların farklı bölgelerde hasara uğradığı, oluşan hasar bölgelerinde saf numunelere göre delaminasyon ve tabaka çekilme hasarlarının daha az olduğu görülmüştür. Bu numunede; nano takviyesi ile matris malzeme olan epoksi reçinenin iyi bir modifikasyonla mekanik özelliklerinin iyileştiği, bu iyileşmenin hibrit kompozit yapıyıda geliştirmesi mekanik ve hasar davranışı açısından sinerjik bir etki oluşturduğu görülmüştür.



Şekil 5.25. Nano takviyeli hibrit kompozit (NH_K) test numunesinin çekme testi sonrası hasar görüntüleri

5.3.3. Tabakalı kompozitlerin üç nokta eğme testi

Üç nokta eğme testi için kesilen numuneler Şekil 5.26'daki Shimadzu (100 kN) marka test cihazı ile ASTM D7264 standardına uygun olarak, oda sıcaklığında ve 3 mm/dak.'lık eğme hızında gerçekleştirilmiştir. Eğme testi, her numune tipi için 3 kez tekrarlanmış olup ortalama değer eğilme dayanımı olarak kabul edilmiştir.

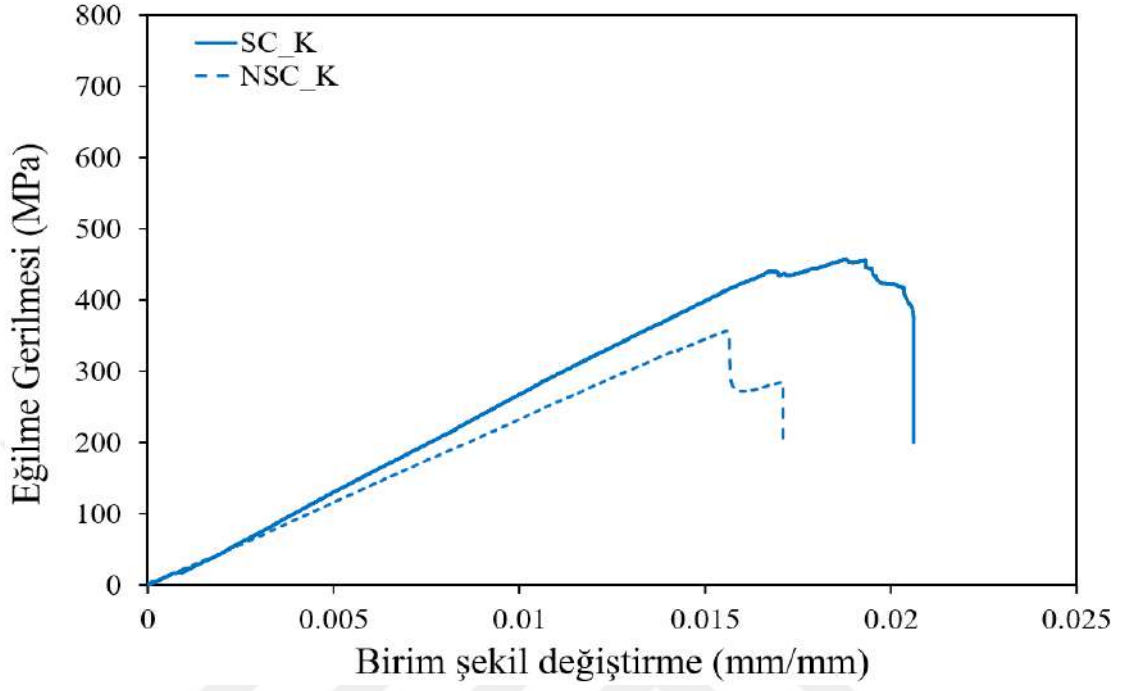


Şekik 5.26. Üç nokta eğme deneyi

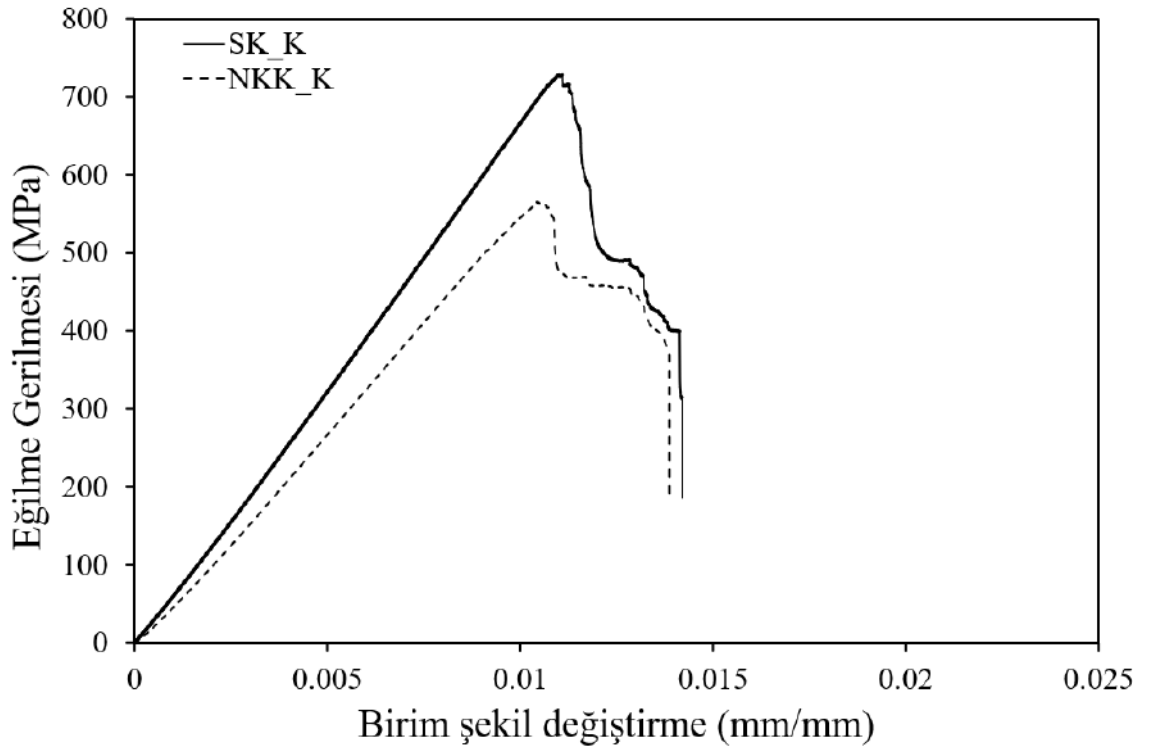
Tabakalı kompozit numunelerin üç nokta eğme testleri sonucu elde edilen gerilme-birim şekil değıştirme grafikleri Şekil 5.27, Şekil 5.28, Şekil 5.29 ve Şekil 5.30’ da verilmiştir. Uygulanan eğme deneyi sonucu elde edilen veriler ile eğme mukavemetinin karşılaştırıldığı grafik Şekil 5.31’de, yüzde uzama değerlerinin karşılaştırıldığı grafik ise Şekil 5.32’de gösterilmiştir. Tabakalı kompozitlerin üç nokta eğme deneyinin tekrarlanabilirliğine dair grafikler Şekil 5.33’de gösterilmiştir. Ayrıca, saf epoksiden üretilen kontrol numunelerin özellikleriyle yapılan karşılaştırma Çizelge 5.4’de verilmiştir.

En yüksek eğme mukavemeti açısından incelendiğinde, saf epoksiye göre %1 KNT takviyeli numunede %14.58 oranında bir düşüş elde edilmiştir. %1.5 SiO₂ takviyeli numunede ise %32.30’luk bir düşüş olmuştur. Hibrit numuneler incelendiğinde tabaka sıralaması (cam/karbon) olan numunede eğme mukavemeti %4 oranında düşerken tabaka sıralaması (karbon/cam) olan numunede eğme mukavemeti %8.47 oranında artış sağlamıştır. Nonopartikül ilaveli epoksi matrisle üretilen elyaf takviyeli kompozitlerinde çekme gerilmesi altında malzemenin mekanik özellikleri artarken, eğme gerilmesi altında mekanik özelliklerin saf epoksi ile üretilen elyaf takviyeli kompozitlere göre genel olarak düştüğü belirlenmiştir. Eğme testinde, basma ve çekme hasar modlarının kombinasyonu oluşmaktadır. Yapılan çalışmanın ilk aşamasında epoksi matris içerisine ilave edilen SiO₂ nanopartikül ve KNT epoksi matrisin rijitliğini önemli ölçüde arttırdığı belirlenmiştir (Şekil 5.6). Aynı zamanda nanopartikül ilaveli epoksi reçine ile üretilen elyaf takviyeli kompozitlerde de yapının

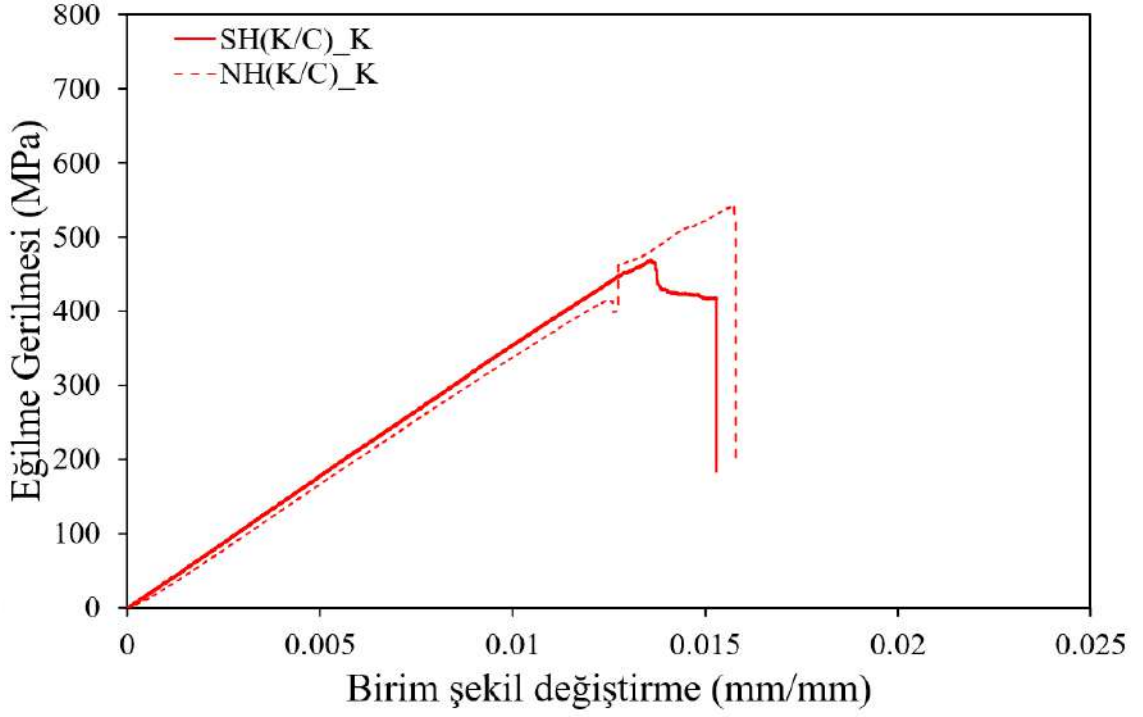
rijitliği genel olarak artmıştır. Artan rijitlik basma bölgesinde malzemenin erken hasara uğramasına ve mukavemetinin dűşmesine neden olmaktadır.



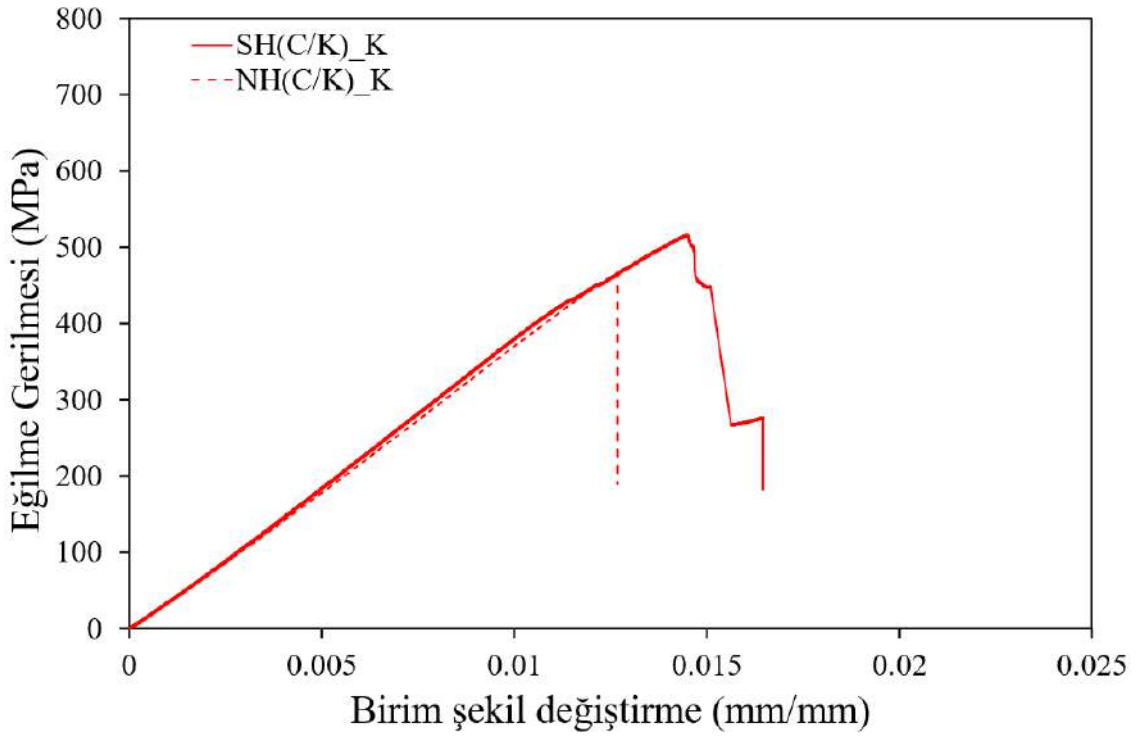
şekil 5.27. Nano SiO₂ takviyeli ve saf epoksili tabakalı kompozitlerin gerilme-birim şekil değiştirme grafiği



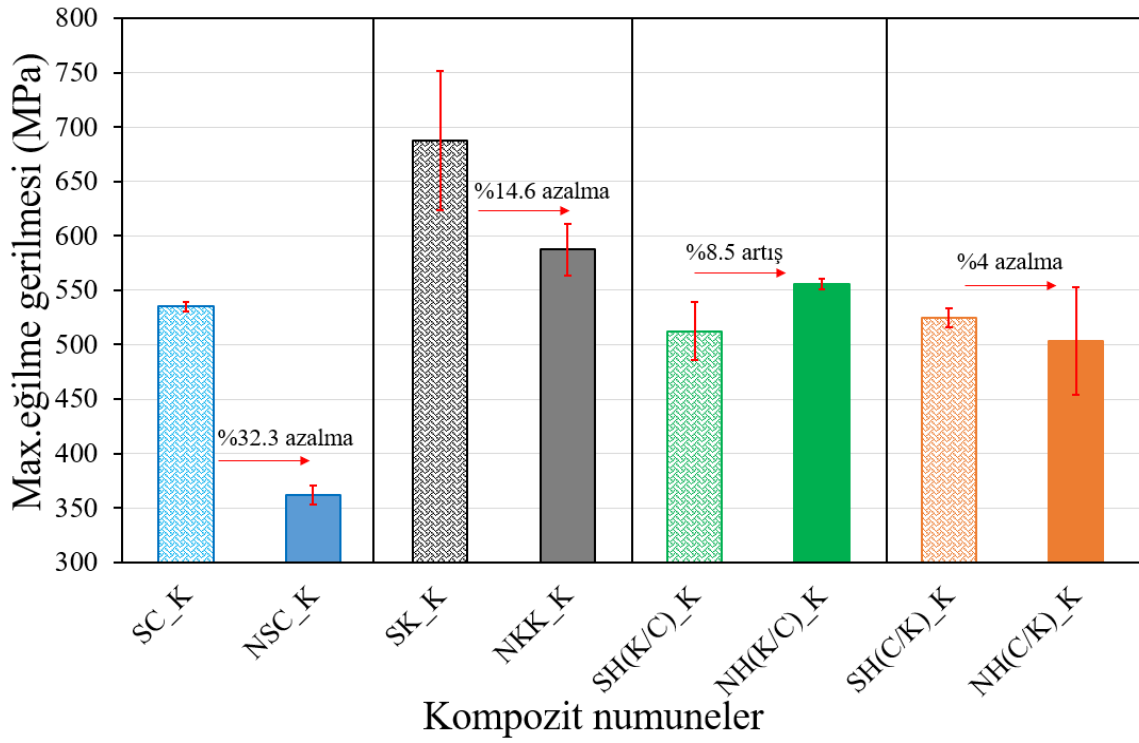
şekil 5.28. KNT takviyeli ve saf epoksili tabakalı kompozitlerin gerilme-birim şekil değiştirme grafiği



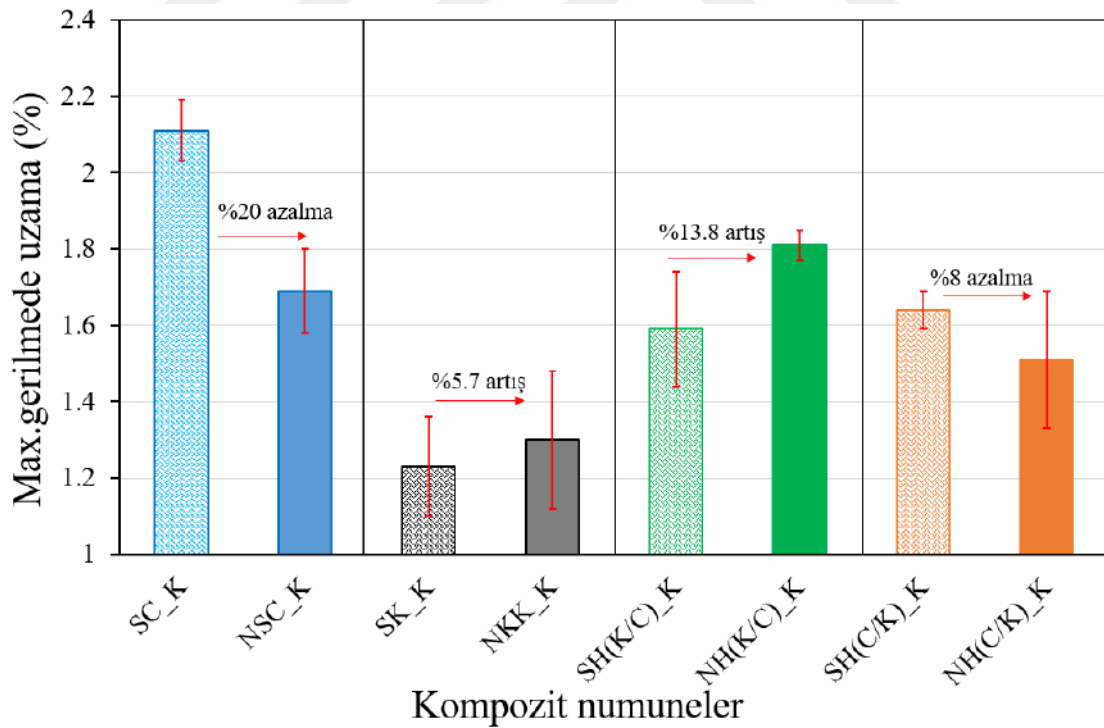
Şekil 5.29. Nano hibrit takviyeli ve saf epoksili (karbon/cam) tabakalı kompozitlerin gerilme-birim şekil değiştirme grafiği



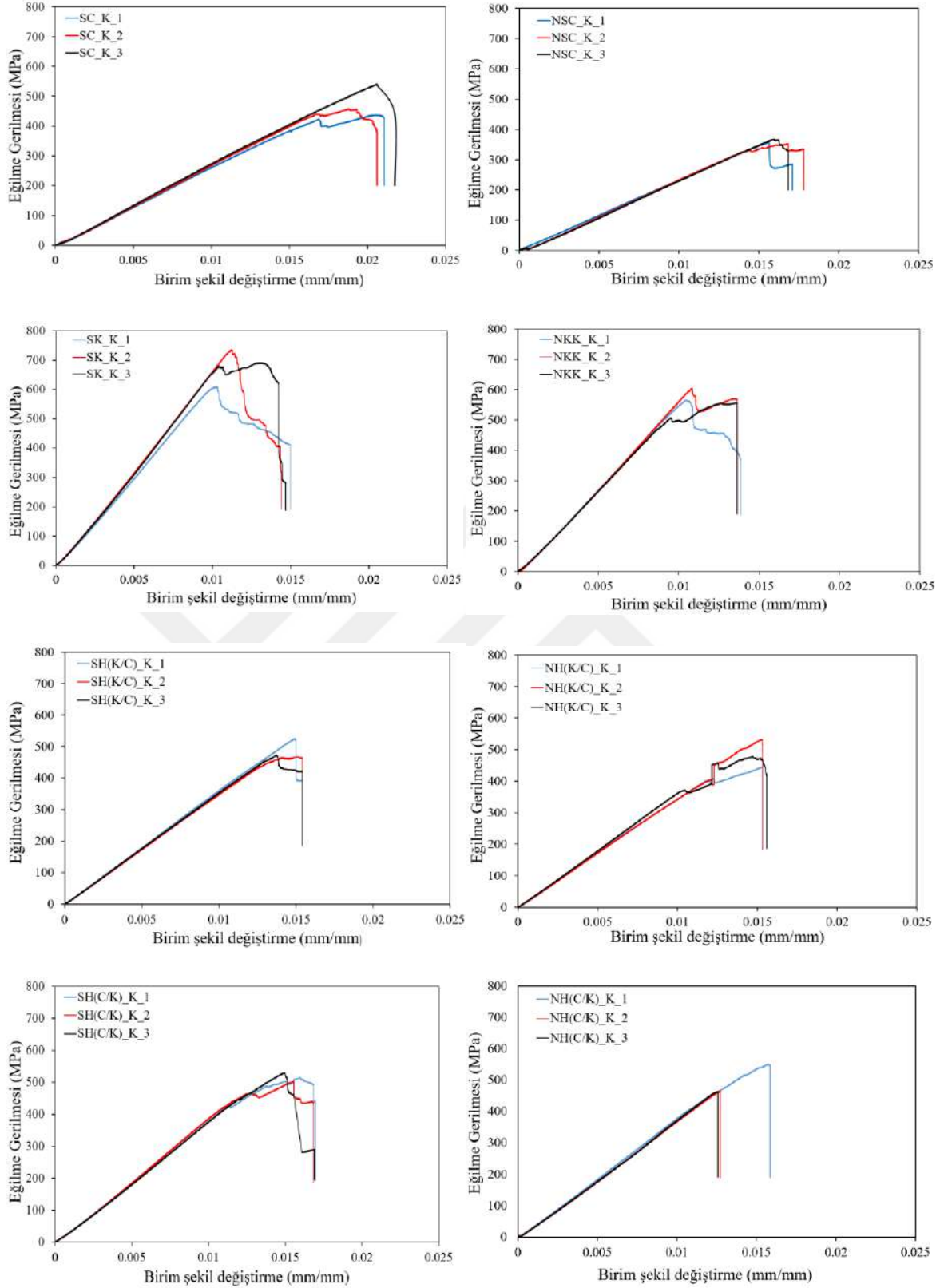
Şekil 5.30. Nano hibrit takviyeli ve saf epoksili (cam/karbon) tabakalı kompozitlerin gerilme-birim şekil değiştirme grafiği



Şekil 5.31. Tabakalı kompozitlerin eğme mukavemeti değerleri



Şekil 5.32. Tabakalı kompozitlerin eğme uzaması değerleri



Şekil 5.33. Tabakalı kompozitlerin eğme deneyi değerlerinin tekrarlanabilirliği

Çizelge 5.4. Nano SiO₂ ve KNT takviyeli tabakalı kompozitlerin mekanik özelliklerinin saf epoksili tabakalı kompozitlere göre değişimi

Eğme deney sonuçları		
Numune Kodu	σ_{Max} (MPa)	Max. Gerilmede uzama (%)
SC_K	535.11±4.25	2.11±0.08
SK_K	687.56±64.27	1.23±0.13
SH(K/C)_K	512.31±26.54	1.59±0.15
SH(C/K)_K	524.44±8.68	1.64±0.05
NSC_K	362.17±8.82	1.69±0.11
NKK_K	587.31±23.93	1.30±0.18
NH(K/C)_K	555.72±5.02	1.81±0.04
NH(C/K)_K	503.51±49.60	1.51±0.18

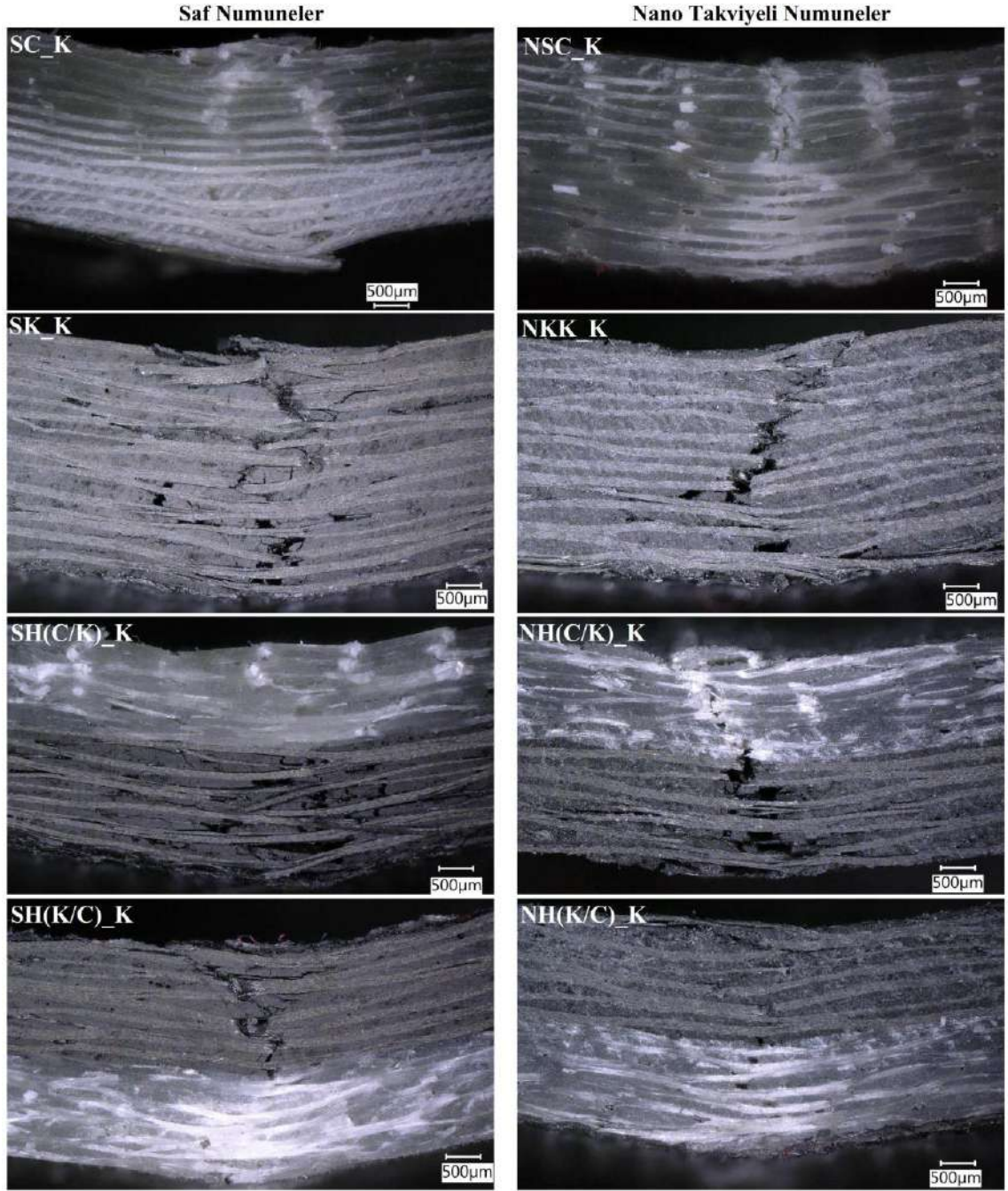
5.3.4. Tabakalı kompozitlerin üç nokta eğme testi sonrası hasar analizi

Elyaf takviyeli epoksi kompozitlerde deney sonrası meydana gelen delaminasyon, debonding, elyaf sıyrılması (fiber pull-out) veya elyaf kırılması gibi hasarlar bulunmaktadır. Bu tür hasar mekanizmalarının meydana gelmesinde elyaf/matris ara yüzeyinin önemi büyüktür. Eğer arayüz yeterince kuvvetli ise debonding oluşumu zorlaşacak ve elyaf hasarından önce bir miktar kısıtlanacaktır. Uygulanan gerilme elyafın dayanımına ulaştığında hasar meydana gelecektir. Bu nedenle, kuvvetli arayüzde gevrek kırılmaya benzer şekilde düz bir yüzey oluşmaktadır ve elyaflar aynı düzleme yakın olarak hasara uğrayacaklardır (Greenhalgh, 2009).

Debonding hasarı oluşumu ile elyaflar matris malzemeden ayrılmış ve tek başlarına yükü karşılamaya çalışmaktadır. Kompozit yapıda tabaka içlerinde debonding hasarlarının birleşmesi ile matris çatlakları oluşmakta ve ilerleyen deplasman ile beraber bu çatlaklar büyüyerek birleşmeye devam etmektedir. Özellikle eğme deneylerinde numunelerin alt kısmında çekmeye maruz kalan tabakalarda görülen bu durum, ilerleyen deplasman değerlerinde tabaka içlerinde korumasız kalan elyaflarda kopmaların oluşmasına neden olmaktadır. Tabaka içlerinde kopan elyaflar yüklemenin devam etmesi ile elyaf çekilme hasarlarının (fiber pull-out) yoğun olarak oluşmasını sebep olmakta ve tabaka bütünlüğünü tamamen bozulmaktadır. Aynı zamanda tabakalar arasında oluşan delaminasyon hasarları tabaka içi oluşan hasarlarla birleşerek sonuç

hasarı oluşmadan önce tabakaların kompozit yapı içerisinde çekilmelere neden olmaktadır (Madenci ve ark., 2020; 2020; 2020; Özkılıç ve ark., 2020). Kompozit yapı bileşenlerinde oluşan mikro hasarların ve yapı genelinde oluşan makro hasarların birleşmesi ile ilerlemeli (progressive) sonuç hasarı oluşmaktadır. Karbon elyaf takviyeli ve hibrit elyafla tabakalanmış numunelerde hasar gelişimi daha hızlı olmakta ve sonuç hasarları yıkımsal (catastrophic) olarak gerçekleşmektedir.

Eğme deneyleri sonrası numunelerde oluşan hasarlar Şekil 5.34’de toplu olarak verilmiştir. Şekil 5.34’de saf, nano takviyeli ve istifleme sıraları değişmiş hibrit numunelerin deney sonrası basma bölgesinde oluşan hasarlar karşılaştırılmalı olarak verilerek oluşan hasar değişimleri incelenmiştir. Genel olarak incelendiğinde; numunelerin üst kısımlarında olan tabakalarda deplasman artışı ile basma hasarlarının geliştiği görülmektedir. Basmanın etkisi ile lokal burkulma bölgelerinin ve bu bölge içerisinde tabakalarda bükülme bantlarının (kink band formation) oluştuğu gözlenmiştir (Gutkin ve Pinho., 2016).



Şekil 5.34. Saf, nano takviyeli ve hibrit test numunelerinin basma testi sonrası genel hasar görüntüleri

Özellikle cam tabakalarda elyaf demetlerinin birçok bölgede büküldüğü basmadan kaynaklı oluşan hasarın basma bölgesinde geniş bir alanı kapsadığı görülmektedir. Basma bölgesi karbon kumaşlarla istiflenen numunelerde mikro burkulma hasarları dar bir alanda oluşmuş ve belli bir açı doğrultusunda ilerlemiştir. Karbon tabakalarda oluşan hasarların cam tabakalara göre gevrek bir kırılma ile gerçekleştiği gözlenmiştir. Karbon tabakalarda özellikle delaminasyon ve mikro burkulma hasarları basma doğrultusunda yoğunlaşmıştır. Numunelerde oluşan transfer

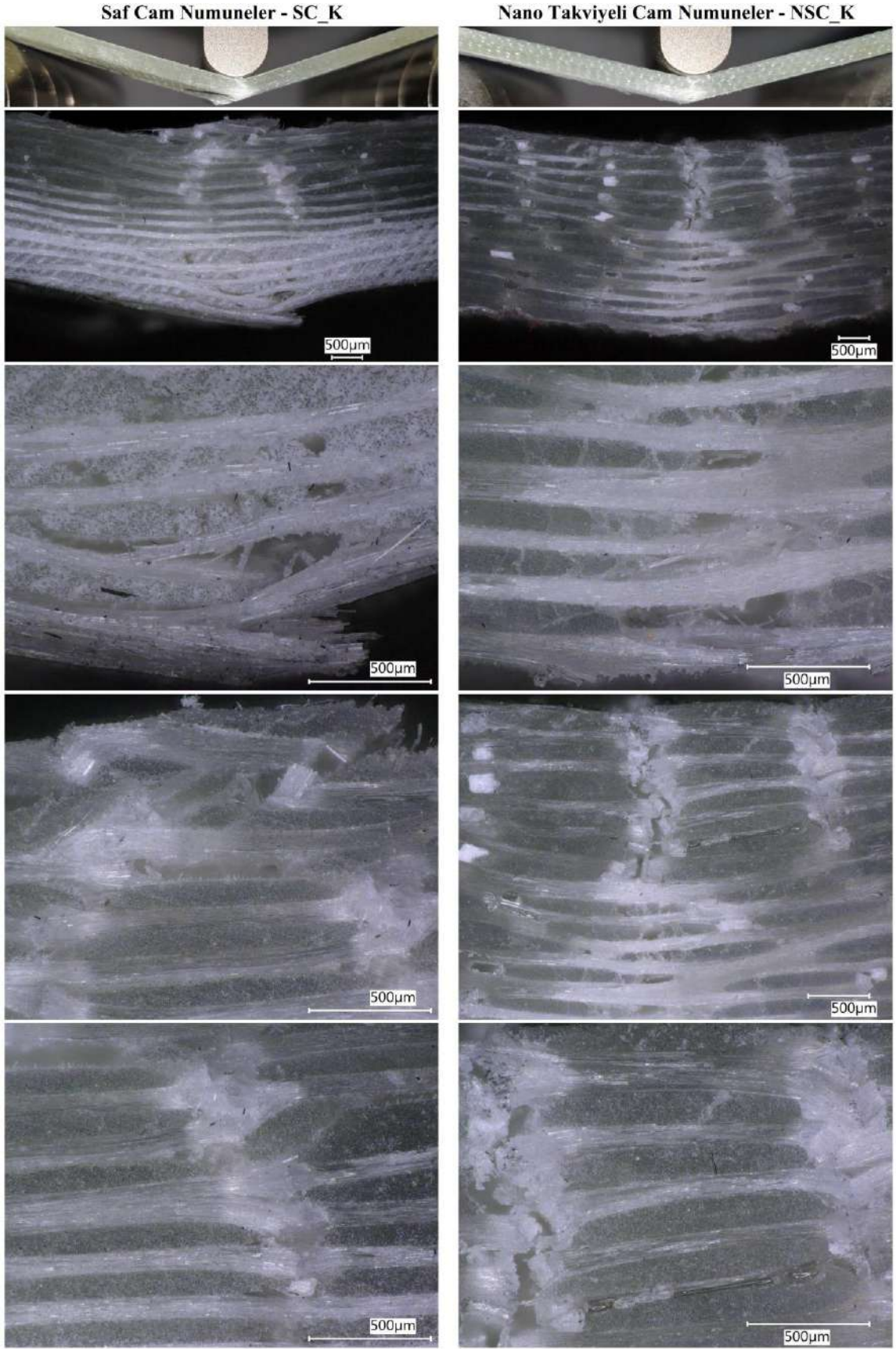
mikro matris çatlaklarının 90° yönlenmiş elyaflarda ve bükülme bandlarının 0° yönlenmiş elyaflarda oluştuğu görülmüştür.

Numunelerin alt kısımlarında tabakalar çekme gerilmesine maruz kalmış ve oluşan hasarlar basma bölgesindeki hasarlardan farklılıklar göstermiştir. Çekme gerilmelerinin etkisi ile 90° yönlenmiş elyaf doğrultularında debonding hasarlarının gerçekleştiği ve bu hasarların birleşmesi ile transfer mikro matris çatlaklarının oluştuğu gözlenmiştir. Yük ve deplasman artışı ile genişleyen matris çatlakları $0^\circ/90^\circ$ tabakalar arasında lokal delaminasyon hasarlarının oluşmasına sebep olmaktadır. Çekme gerilmelerinin artışı ile lokal delaminasyonlar ilerlemiş ve basma bölgesinin altında geniş bir delaminasyon bölgesi oluşturmuştur. Yoğun matris çatlakları ve delaminasyon bölgesinde en alt tabakalardan başlamak üzere elyaf kopmaları gözlenmiştir. Deplasman artışı ile üst tabakalarda da elyaf kopmaları oluşmuş ve bununla beraber yük taşıma kapasitesinde hızlı bir düşüş gerçekleşmiştir. İlerlemeli oluşan hasar bölgesinde elyafları kopan tabakalarda çekilmelerin oluştuğu tespit edilmiştir. Tamamen karbon ve alt tabakası karbon olan hibrit numunelerde oluşan hasarlar dar bir alanda toplanmış, cam numunelere göre daha gevrek bir hasarın oluştuğu gözlenmiştir. Genel olarak saf ve nano takviyeli numuneler arasında oluşan hasar modlarında gerçekleşen hasar mekanizmalarında bazı farklılıklar gözlenmiştir. Saf numunelerle kıyaslandığında nano takviyeli numunelerde matris çatlakları, delaminasyon ve debonding hasarlarında belirgin azalmalar gözlenirken hasar bölgelerinin daha dar bir alanda oluştuğu tespit edilmiştir. Söz konusu farkların daha iyi anlaşılması açısından geniş ve karşılaştırmalı bir hasar analizi yapılmıştır.

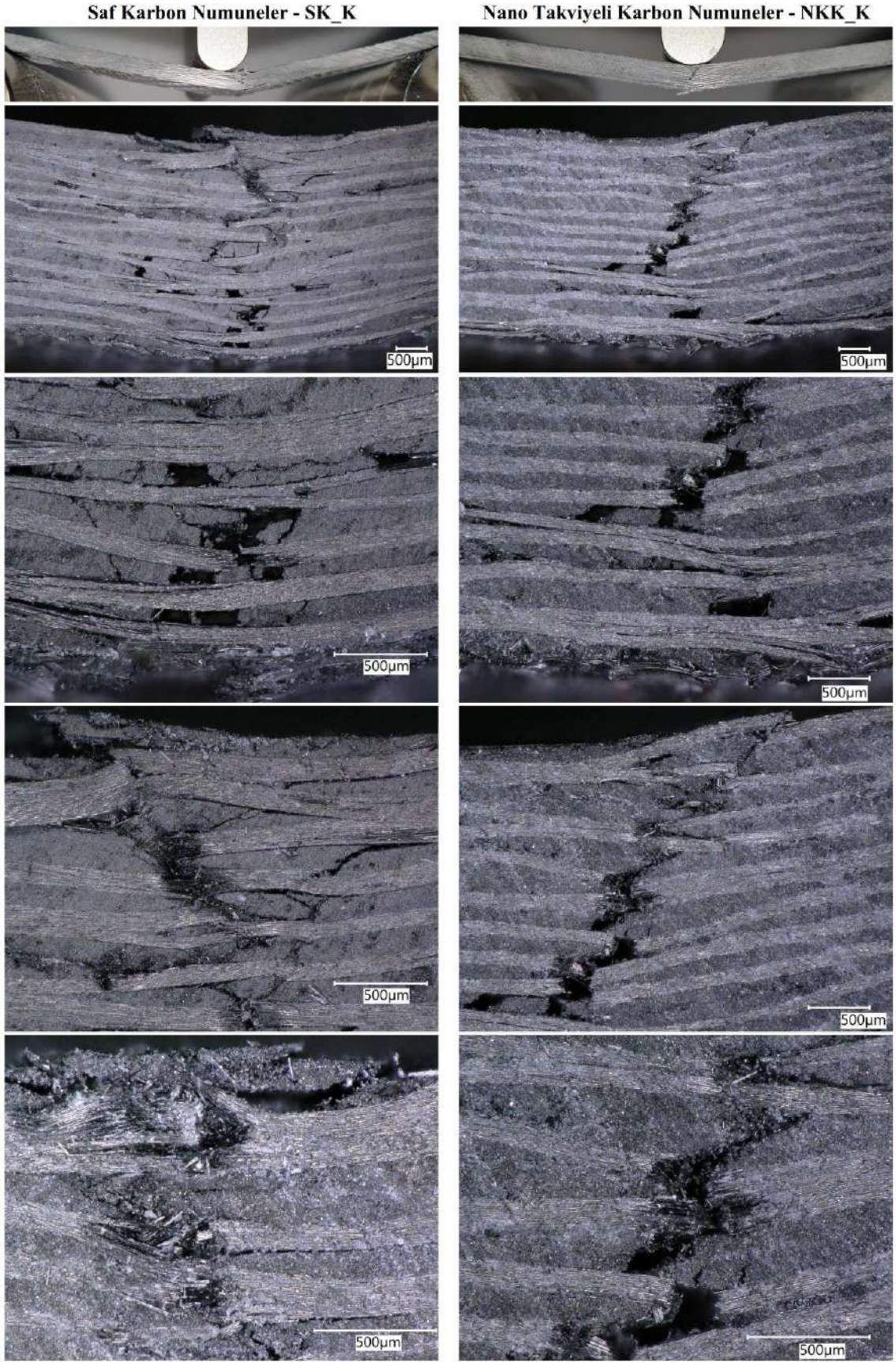
Saf (SC_K) ve nano takviyeli (NSC_K) cam test numunelerinin basma testi sonrası hasar görüntüleri Şekil 5.35’de verilmiştir. Bu numuneler Şekil 5.27 ve Şekil 5.31 ile birlikte incelendiğinde; yükleme şartlarından dolayı nano takviyesinin çekme testlerinde görülen iyileşmenin aksine maksimum eğme gerilmelerinde saf numunelerle kıyaslandığında %32.3 MPa kadar düşüşe sebep olduğu görülmüştür. Numuneler hasar açısından incelendiğinde; saf numunelerde üst tabakalarda basma noktasının altında dar bir alanda oluşan burkulma bandları nano takviyeli numunelerde daha geniş bir alanda oluştuğu görülmüştür. Aynı numunelerin alt kısmında kalan tabakalarda saf numunelerde dar bir alanda oluşan delaminasyon, elyaf kırılma ve tabaka hasarları nanolu numunelerde geniş bir alanda yoğun matris çatlakları ve delaminasyon hasarı olarak görülmüştür. Nano takviyesi ile elde edilen modifikasyon etkisinin çekme

numunelerinde olduğu gibi elyaf doğrultusunda etkisini gösterdiği, bunun yanında eğme numunelerinde yükleme şartlarından dolayı etkisini gösteremediği anlaşılmıştır. Eğme numunelerinde elyafa gelen yükler öncelikle matris hasarlarına ve bununla beraber delaminasyon hasarlarını oluşturmakta, bu durumda da numunelerin eğilme rijitliklerinde önemli düşüşler sebep olmaktadır. Nono takviyeli numunelerde basma bölgesinde oluşan burkulma bandlarındaki elyaf kırılmaları ve cam tabakalarda 90° yönlenmiş elyaf demetlerinde oluşan matris çatlakları eğilme rijitliklerinde düşüşlerin sebebi olarak yorumlanmıştır. Nanolu numunelerde elyaf hasarlarının az olması veya hiç oluşmaması SiO₂ nano takviyesinin elyaf ve matris arasında oluşan arayüzeyi güçlendirdiği anlaşılmıştır.

Saf (SK_K) ve nano takviyeli (NKK_K) karbon test numunelerinin basma testi sonrası hasar görüntüleri Şekil 5.36'da karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Bu numuneler Şekil 5.28 ve Şekil 5.31 ile birlikte incelendiğinde; cam numunelerde olduğu gibi hem maksimum eğilme gerilmesinde hemde eğilme rijitliklerinde düşüşler gözlenmiştir. Karbon elyafların doğası gereği gevrek bir yapıya sahip olması hasar gelişiminde bazı farklılıklar oluşturmuştur. Saf karbon numunelerin üst kısmında basma bölgesinde dar bir alanda oluşan burkulma bandları ve çekme bölgesinde geniş bir alanda oluşan delaminasyon hasarları görülmüştür. ÇCKNT takviyeli numunelerde bu durum tam tersi olmuş ve basma bölgesinde burkulma bandları birleşerek tabakalar arasında geniş bir transfer çatlakları formunu almıştır. Bu durum nano takviyeli numunenin yük taşıma kapasitesini ve eğilme rijitliğini önemli ölçüde düşürmüştür. Saf karbon numunelerde hem basma bölgesinde hemde çekme bölgesinde 90° yönlenmiş elyaf demetlerinde yoğun olarak oluşan matris çatlakları nano takviyeli numunelerde yoğun olarak görülmemiştir. ÇCKNT takviyesi ile epoksi reçine modifikasyonu matris malzemeyi gevrek bir yapıya dönüştürmüş, nano dogbone ve nano takviyeli karbon elyaf çekme numunelerinde oluşan olumlu etkisi yükleme şartlarından dolayı eğme numunelerinde görülemediği. Nano takviyeli numunelerde hasar bölgelerinde delaminasyon ve matris çatlaklarının çok az oluşması ÇCKNT takviyesi ile epoksi reçine modifikasyonlu matris malzeme ve karbon elyaflar arasında iyi bir arayüzey oluşturduğu şeklinde yorumlanabilmektedir.



Şekil 5.35. Saf (SC_K) ve nano takviyeli (NC_K) cam test numunelerinin basma testi sonrası hasar görüntüleri

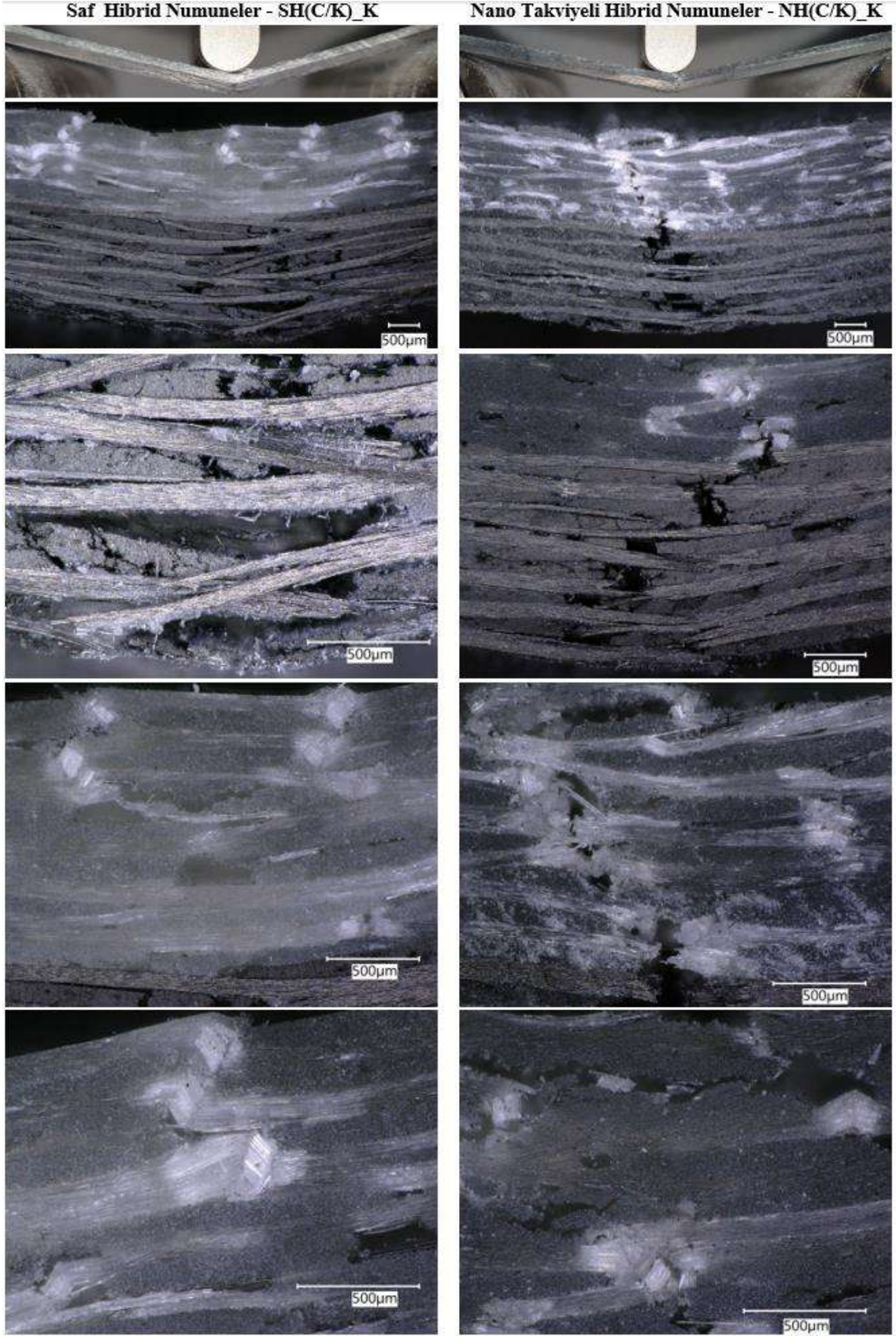


Şekil 5.36. Saf (SK_K) ve nano takviyeli (NKK_K) karbon test numunelerinin basma testi sonrası hasar görüntüleri

Bu çalışmada nano takviyesi ile birlikte cam ve karbon elyaflar kullanılarak hibritasyon etkisinde incelenmiş ve üç noktadan eğme testleri sonrası hasar analizleri karşılaştırmalı olarak yapılmıştır.

Şekil 5.37’de verilen cam tabakaların üstte istiflendiği saf (SH(C/K)_K) ve nano takviyeli (NH(C/K)_K) hibrit test numunelerinin basma testi sonrası hasar görüntüleri verilmiştir. Saf (SH(C/K)_K) üstü cam tabakalarla istiflenmiş hibrit numunede cam tabakasında oluşan hasarlar diğer numunelerde oluşan hasarlarla benzerlik göstermiş ve Şekil 5.30’da görüldüğü üzere yaklaşık 450 MPa eğilme gerilme değerinde oluşmaya başlayan burkulma bandları geniş bir alana yayılarak ilerlemiştir. Tamamen hasara uğramayan cam tabakası numunenin deplasman yapmasına izin vermiş ve alt kısımda istiflenen karbon tabakasına uygulanan yükü aktarmaya devam etmiştir. Bu sayede çekme bölgesinde bulunan karbon tabakaları 524.44 MPa maksimum eğme gerilme değerinde kırılıp delaminasyon ve tabaka çekilme hasarı oluşana kadar yük taşımaya devam etmiştir. Karbon tabakasında sırası ile debonding, matris çatlakları, delaminasyon, elyaf kırılmaları, tabaka kırılmaları ve tabaka çekilme hasarlarının oluştuğu gözlenmiştir.

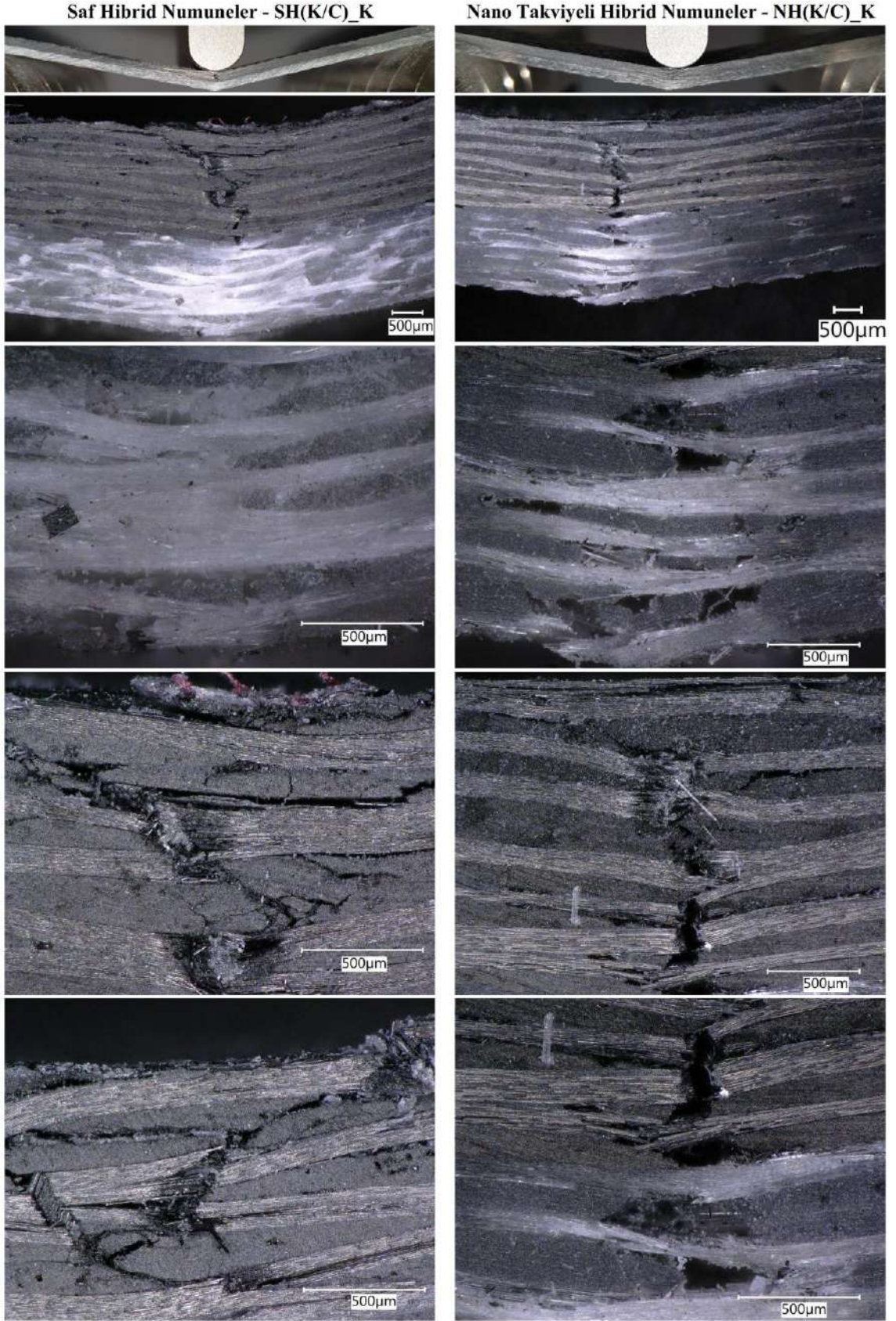
Nano takviyeli (NH(C/K)_K) hibrit test numunelerinde saf numunelerden farklı olarak cam tabakada burkulma bandları tekbir noktada yoğunlaşmış ve tabakaların sürekliliğini bozarak karbon tabakasına kadar ilerlemiştir. Bu durum karbon tabakalarında oluşan hasarların hızlı bir şekilde ilerlemesine neden olmuş ve saf numunelere göre eğilme gerilmesinde %4’lük bir düşüşe sebebiyet vermiştir (Şekil 5.31). Bu numunede de nano takviyesi cam tabakasında matris bileşenini gevrek bir yapıya sokmuş ve burkulma bandlarının aynı hizada ve peşpeşe gerçekleşmesine sebep olmuştur. Eğilme gerilmesinin tek bir hasar mekanizması üzerine yoğunlaşması ile karbon tabakalarda oluşan hasarlarda aynı hasar bandını takip etmiştir. Çekme bölgesinde bulunan karbon tabakalarında 90° yönlenmiş elyaf demetlerinde aynı hasar bandında geniş matris çatlaklarının oluştuğu, 0° yönlenmiş elyaf demetlerinde elyaf kırılmaları neticesinde tabaka kopmaları ve delaminasyon hasarları ile ilerlemeli bir sonuç hasarı gerçekleşmiştir.



Şekil 5.37. Saf (SH(C/K)_K) ve nano takviyeli (NH(C/K)_K) hibrit test numunelerinin basma testi sonrası hasar görüntüleri

Şekil 5.38’de saf (SH(K/C)_K) ve nano takviyeli (NH(K/C)_K) hibrit test numunelerinin basma testi sonrası hasar görüntüleri verilmiştir. Bu numuneler Şekil 5.29 ve Şekil 5.31 ile birlikte incelendiğinde; diğer kompozit numunelerden farklı olarak eğme testleri sonuçları bakımından farklılık göstermiştir. Hibritasyonun ve istifleme sırasının sağladığı avantajlar neticesinde nano takviyesinin maksimum artışla etkisini göstermiştir. Aynı şekilde % uzama değerinde de %13.8 artış görülmüştür (Şekil 5.32). Hasar açısından incelendiğinde; saf numunelerde numunenin üst kısmına istiflenen, basmaya maruz kalan karbon tabakası 512.31 MPa gerilme seviyesinde diğer numunelerde olduğu gibi burkulma bandlarının oluşması, hasar bölgesinde matris çatlaklarının ve delaminasyon hasarlarının birleşmesi sonucu tamamen hasara uğramıştır. Şekil 5.29’dan da anlaşıldığı üzere karbon tabakalarının hasara uğraması ile basma yükünü cam tabakaları karşılamaya çalışmış ve yükte düşüşler meydana gelmiştir. Çekme yüklerine maruz kalan cam tabakalarda geniş bir alanda yoğun olarak debonding, matris çatlağı ve delaminasyon hasarlarının oluştuğu gözlenmiş bu aşamada deney sonlandırılmıştır.

Nano takviyeli numuneler (NH(K/C)_K) saf numunelere göre hasar davranışı ve gelişimi tamamen değişmiştir. Nano takviyesi ile modifiye olan matris yapı hibritasyonun katkısı ile sinerjik etki oluşturarak diğer nano takviyeli numunelerden ayrılmış ve saf numunelere göre eğme gerilme değerinde %8.5 (Şekil 5.31) uzama değerinde de %13.8 artış sağlamıştır. Hasar gelişimi açısından değerlendirildiğinde; saf numunelerin aksine hem karbon tabakalarda hemde cam tabakalarda hasar dar bir alanda gerçekleşmiştir. Karbon tabakalarda oluşan burkulma bandları ile aynı hizada oluşarak birleşmiş, cam tabakalarda karbon tabaka hasarı altına yoğunlaşarak debonding, matris çatlağı ve delaminasyon hasarlarının birleşmesi ile sonuç hasarı gerçekleşmiştir.



Şekil 5.38. Saf (SH(K/C)_K) ve nano takviyeli (NH(K/C)_K) hibrit test numunelerinin basma testi sonrası hasar görüntüleri

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

6.1. Sonuçlar

Yapılan tez çalışmasının amacı SiO₂ ve KNT nanopartikülünün cam ve karbon elyaf tabakalı kompozitinin mekanik özelliklerine etkisini incelemektir. Tez çalışmasının amacı doğrultusunda öncelikle epoksi matrise en uygun SiO₂ ve KNT ilave oranı belirlenmiş ve çekme testi sonuçlarında bu oran ağırlıkça SiO₂ için %1.5 KNT içinse %1 olarak tespit edilmiştir. Çalışmanın ikinci aşamasında ise bu oran kullanılarak cam ve karbon elyaf takviyeli nanopartikül ilaveli tabakalı kompozitler vakum torbalama yöntemiyle üretilmiştir. Sonrasında epoksi/cam-karbon elyaf ve epoksi/nanopartikül/cam-karbon elyaf sistemlerinden oluşan tabakalı kompozitler mekanik özellikler açısından karşılaştırılmak üzere çekme ve üç nokta eğme testlerine tabi tutulmuştur. Elde edilen önemli sonuçlar aşağıda sıralanmıştır.

- %1.5 SiO₂ nanopartikül ilavesi epoksi matrisin çekme dayanımını %11.53, %1 KNT ilavesi ise %12.60 arttırmıştır.
- Nano ilave oranı azaldıkça epoksi numunelerin çekme dayanımında azalmalar olduğu tespit edilmiştir. En düşük çekme dayanımı bakımından %0.5 KNT takviyeli numune %12.09 artarken %0.5 SiO₂ takviyeli numune %7.35 artışla en düşük sonucu vermiştir.
- KNT ve SiO₂ nanopartikül ilavesinin cam ve karbon elyaf takviyeli tabakalı kompozitlerin çekme gerilmesi altında mekanik özelliklerini iyileştirmede etkili olduğu gözlenirken, eğme gerilmesinde bası gerilmesinin daha ağır basması sonucu saf epoksi matrisli kompozite göre daha zayıf bir dayanım gösterdiği tespit edilmiştir.
- Çekme testi sonucu saf epoksiye göre çekme dayanımında KNT takviyeli numunede %10.20, SiO₂ takviyeli numunede %2.5 ve en iyi sonucu veren hibrit numunede ise %30.8 artış sağlanmıştır. Statik tokluk değerinde KNT takviyeli numunede çekme dayanımında %26.60 ve çekme uzamasında %15, SiO₂ takviyeli numunede statik tokluk değerinde %3.20 ve çekme uzamasında %4, hibrit takviyeli numunede statik tokluk değerinde %23 ve çekme uzamasında %6.20 oranında artış sağlanmıştır.

- Üç nokta eğme testi sonucu ise saf epoksiye göre eğilme mukavemetinde KNT takviyeli numunede %14.60, SiO₂ takviyeli numunede %32.3 oranında düşüş elde edilmiştir. Hibrit numuneler incelendiğinde tabaka sıralaması (cam/karbon) olan numunede eğme mukavemeti %4 oranında düşerken tabaka sıralaması (karbon/cam) olan numunede eğme mukavemeti %8.47 uzama değerinde de %13.8 artış görülmüştür. Bu artışın temel sebebi olarak ise hibritasyonun ve istifleme sırasının sağladığı avantajlar neticesinde nano takviyelerinde nanopartiküllerin epoksinin çapraz bağ yoğunluğunu artırması olarak düşünülmektedir.

6.2. Öneriler

Çalışmanın sonuçları göz önüne alındığında şu önerilerde bulunulabilir;

- Çalışmamızda kullanılan epoksi düşük viskoziteye sahiptir. Orta veya yüksek viskoziteli epoksi kullanılarak çalışma yürütülebilir. Partikül dağılım mekanizması değişeceği için orta veya yüksek viskoziteli epoksilerde partikül ilavesi yapılarak dağılım incelenebilir.
- Yeterli parametrenin belirlenmesi halinde istatistiksel analiz gerçekleştirilebilir.
- Kullanılan SiO₂ ve KNT'nin epoksi matrisle daha uyumlu olabilmesi için yüzeyi modifiye edilmiş nanopartiküller kullanılabilir. Matris/elyaf arayüzü böylece daha kuvvetli hale gelebilir ve üç nokta eğilme testinin mekanik özelliklerinde artışlar elde edilebilir.
- Deneyler 'kriyojenik' gibi farklı ortam şartlarında uygulanabilir.
- Parametreler sabit bırakılarak üretim metodu değiştirilip farklı üretim yönteminin mekanik özellikler üzerindeki etkisi araştırılabilir.

KAYNAKLAR

- Abdelal, N. R., Al-Saleh, M. H., & Irshidat, M. R. (2018). Utilizing vacuum bagging process to prepare carbon fiber/CNT-modified-epoxy composites with improved mechanical properties. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 57(3), 175-184.
- Akçıl, A., Tuncuk, A., & Deveci, H. (2007). Kuvarsın saflaştırılmasında kullanılan kimyasal yöntemlerin incelenmesi. *Bilimsel Madencilik Dergisi*, 46(4), 3-10.
- Aksoylu, C., Yazman, Ş., Özkılıç, Y. O., Gemi, L., & Arslan, M. H. (2020). Experimental analysis of reinforced concrete shear deficient beams with circular web openings strengthened by CFRP composite. *Composite Structures*, 112561.
- Asadi, A., Miller, M., Moon, R., & Kalaitzidou, K. (2016). Improving the interfacial and mechanical properties of short glass fiber/epoxy composites by coating the glass fibers with cellulose nanocrystals. *Express Polymer Letters*, Vol. 10 (7): 11 pages.: 587-597., 10(7), 587-597.
- Bağcı, M. (2010). *Cam elyaf takviyeli kompozit malzemelerin erozyon aşınma davranışının incelenmesi* (Doctoral dissertation, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Balasubramanian, M. (2013). *Composite materials and processing*. CRC press.
- Barbero, E. J. (2010). *Introduction to Composite Material Design*. CRC Press/Taylor & Francis Group, LLC.
- Becenen, N. (2008). Traktör kaportalarında kullanılan plastik matrisli kompozit malzemelerin yapısal özelliklerinin iyileştirilmesi üzerine bir araştırma.
- Bilisik, K., & Yolacan, G., (2014). Dokuma E-cam/polyester nano silika kompozitlerin eğilme özellikleri, *XIII. Uluslararası İzmir Tekstil ve Hazır Giyim Sempozyumu*, s.229-234.
- Böger, L., Sumfleth, J., Hedemann, H., & Schulte, K. (2010). Improvement of fatigue life by incorporation of nanoparticles in glass fibre reinforced epoxy. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 41(10), 1419-1424.
- Campbell, F. C. (2010). *Structural composite materials*. ASM international.
- Cha, J., Jun, G. H., Park, J. K., Kim, J. C., Ryu, H. J., & Hong, S. H. (2017). Improvement of modulus, strength and fracture toughness of CNT/Epoxy nanocomposites through the functionalization of carbon nanotubes. *Composites Part B: Engineering*, 129, 169-179.
- Chen, C., Justice, R. S., Schaefer, D. W., & Baur, J. W. (2008). Highly dispersed nanosilica-epoxy resins with enhanced mechanical properties. *Polymer*, 49(17), 3805-3815.

- Chen, C., Justice, R. S., Schaefer, D. W., & Baur, J. W. (2008). Highly dispersed nanosilica–epoxy resins with enhanced mechanical properties. *Polymer*, *49*(17), 3805-3815.
- Chen, C., Justice, R. S., Schaefer, D. W., & Baur, J. W. (2008). Highly dispersed nanosilica–epoxy resins with enhanced mechanical properties. *Polymer*, *49*(17), 3805-3815.
- Cheremisinoff, N. P., & Cheremisinoff, P. N. (1995). *Fiberglass reinforced plastics: Manufacturing techniques and applications*. William Andrew.
- Chou, W. J., Wang, C. C., & Chen, C. Y. (2008). Characteristics of polyimide-based nanocomposites containing plasma-modified multi-walled carbon nanotubes. *Composites Science and Technology*, *68*(10-11), 2208-2213.
- Clair, B. S. (2016). *Nanotechnology: Predicting The Future*.
- Coleman, J. N., Khan, U., Blau, W. J., & Gun'ko, Y. K. (2006). Small but strong: a review of the mechanical properties of carbon nanotube–polymer composites. *Carbon*, *44*(9), 1624-1652.
- 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*(8), 1089-1097.
- Demircan, Ö., Ashibe, S., Kosui, T., & Nakai, A. (2015). Effect of various knitting techniques on mechanical properties of biaxial weft-knitted thermoplastic composites. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, *28*(6), 896-910.
- Demirci, M. T., Tarakçıoğlu, N., Avcı, A., Akdemir, A., & Demirci, I. (2017). Fracture toughness (Mode I) characterization of SiO₂ nanoparticle filled basalt/epoxy filament wound composite ring with split-disk test method. *Composites Part B: Engineering*, *119*, 114-124.
- Durgun, İ., Vatansever, O., Ertan, R., & Yavuz, N., (2014), Polimer esaslı elyaf takviyeli kompozit malzemelerde üretim tekniğinin mekanik özellikler üzerindeki etkisi, Otekon14, 7. Otomotiv Teknolojileri Kongresi, 26-27 Mayıs, Bursa.
- Díez-Pascual, A. M., Ashrafi, B., Naffakh, M., González-Domínguez, J. M., Johnston, A., Simard, B., ... & 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*(8), 2817-2833.
- Erdal, M. O., Yazman, Ş., Gemi, L., & Yapıcı, A. (2018). The effect of nonwoven electrospun PAN nanofiber mat on mechanical and thermal properties of epoxy composites. *Journal of Natural and Applied Sciences*, *22*(2), 528-535.

- Erdoğan, M. (1998). Malzeme bilimi ve mühendislik malzemeleri. *Nobel Yayınevi, Ankara.*
- Eskizeybek, V. (2012). *Yüzeylerine kimyasal olarak karbon nanotüpler bağlanmış örgü cam fiber/epoksi nanokompozitlerin üretimi ve tabakalar arası kırılma davranışının incelenmesi* (Doctoral dissertation, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Eskizeybek, V. (2012). *Yüzeylerine kimyasal olarak karbon nanotüpler bağlanmış örgü cam fiber/epoksi nanokompozitlerin üretimi ve tabakalar arası kırılma davranışının incelenmesi* (Doctoral dissertation, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Fan, Z., Santare, M. H., & Advani, S. G. (2008). Interlaminar shear strength of glass fiber reinforced epoxy composites enhanced with multi-walled carbon nanotubes. *Composites Part A: Applied science and manufacturing*, 39(3), 540-554.
- Frank, S., Poncharal, P., Wang, Z. L., & De Heer, W. A. (1998). Carbon nanotube quantum resistors. *science*, 280(5370), 1744-1746.
- Gao, S. L., Mäder, E., & Plonka, R. (2008). Nanocomposite coatings for healing surface defects of glass fibers and improving interfacial adhesion. *Composites Science and Technology*, 68(14), 2892-2901.
- Gay, D. (2014). *Composite materials: design and applications*, CRC press, New York, ISBN-13: 978-1-4665-8488-4.
- Gemi, L. (2018). Investigation of the effect of stacking sequence on low velocity impact response and damage formation in hybrid composite pipes under internal pressure. A comparative study. *Composites Part B: Engineering*, 153, 217-232.
- Gemi, L., Aksoylu, C., Yazman, Ş., Özkılıç, Y. O., & Arslan, M. H. (2019). Experimental investigation of shear capacity and damage analysis of thinned end prefabricated concrete purlins strengthened by CFRP composite. *Composite Structures*, 229, 111399.
- Gemi, L., Kayrıçı, M., Uludağ, M., Gemi, D. S., & Şahin, Ö. S. (2018). Experimental and statistical analysis of low velocity impact response of filament wound composite pipes. *Composites Part B: Engineering*, 149, 38-48.
- Gemi, L., Köklü, U., Yazman, Ş., & Morkavuk, S. (2020). The effects of stacking sequence on drilling machinability of filament wound hybrid composite pipes: Part-1 mechanical characterization and drilling tests. *Composites Part B: Engineering*, 186, 107787.
- Gemi, L., Köroğlu, M. A., & Ashour, A. (2018). Experimental study on compressive behavior and failure analysis of composite concrete confined by glass/epoxy±55 filament wound pipes. *Composite Structures*, 187, 157-168.

- Gemi, L., Morkavuk, S., Köklü, U., & Yazman, Ş. (2020). The effects of stacking sequence on drilling machinability of filament wound hybrid composite pipes: Part-2 damage analysis and surface quality. *Composite Structures*, 235, 111737.
- Gemi, L., Yazman, S., Uludağ, M., Dispinar, D., & Tiryakioğlu, M. (2017). The effect of 0.5 wt% additions of carbon nanotubes & ceramic nanoparticles on tensile properties of epoxy-matrix composites: a comparative study. *Mater. Sci Nanotechnol.*
- Ghadami, F., Dadfar, M. R., & Kazazi, M. (2016). Hot-cured epoxy-nanoparticulate-filled nanocomposites: Fracture toughness behavior. *Engineering Fracture Mechanics*, 162, 193-200.
- Ghaleb, Z. A. A., Jaafar, M., & Rashid, A. A. (2019). Fabrication Methods of Carbon-Based Rubber Nanocomposites and Their Applications. In *Carbon-Based Nanofiller and Their Rubber Nanocomposites* (pp. 49-63). Elsevier.
- Gkikas, G., Barkoula, N. M., & Paipetis, A. S. (2012). Effect of dispersion conditions on the thermo-mechanical and toughness properties of multi walled carbon nanotubes-reinforced epoxy. *Composites Part B: Engineering*, 43(6), 2697-2705.
- Godara, A., Gorbatiikh, L., Kalinka, G., Warriier, A., Rochez, O., Mezzo, L., ... & Verpoest, I. (2010). Interfacial shear strength of a glass fiber/epoxy bonding in composites modified with carbon nanotubes. *Composites Science and Technology*, 70(9), 1346-1352.
- Gogotsi, Y. (2006). *Nanotubes and nanofibers*. CRC press.
- Gojny, F. H., Wichmann, M. H., Fiedler, B., & Schulte, K. (2005). Influence of different carbon nanotubes on the mechanical properties of epoxy matrix composites—a comparative study. *Composites Science and Technology*, 65(15-16), 2300-2313.
- Gojny, F. H., Wichmann, M. H., Fiedler, B., & Schulte, K. (2005). Influence of different carbon nanotubes on the mechanical properties of epoxy matrix composites—a comparative study. *Composites Science and Technology*, 65(15-16), 2300-2313.
- Goyat, M. S., Suresh, S., Bahl, S., Halder, S., & Ghosh, P. K. (2015). Thermomechanical response and toughening mechanisms of a carbon nano bead reinforced epoxy composite. *Materials Chemistry and Physics*, 166, 144-152.
- Greenhalgh, E. (2009). *Failure analysis and fractography of polymer composites*. Elsevier.
- Gutkin, R., & Pinho, S. (2016). Review on failure of laminated composites: Experimental perspective and modelling.
- H.Y. Ersoy, (2001). Kompozit malzeme. *Literatür Yayıncılık Dağıtım Pazarlama. San. Tic. Ltd. Şti. İstanbul.*

- Hamouda, A. M. S., Sulaiman, S., Vijayaram, T. R., & Sayuti, M. (2007). Processing and characterisation of particulate reinforced aluminium silicon matrix composite. *Journal of Achievements of Materials and Manufacturing Engineering*, 25(2), 11-16.
- Iijima, S. (1991). Helical microtubules of graphitic carbon. *nature*, 354(6348), 56.
- İnançer, G. (2015). Farklı takviye malzemeli plastik kompozitlerin darbe davranışına çevrenin etkisi. *Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İzmir*.
- İsmail, D., Onur, V., Rukiye, E., & Nurettin, Y. (2014). Polimer Esaslı Elyaf Takviyeli Kompozit Malzemelerde Üretim Tekniğinin Mekanik Özellikler Üzerindeki Etkisi. 7. *Otomotiv Teknolojileri Kongresi*.
- Jalali, M., Dauterstedt, S., Michaud, A., & Wuthrich, R. (2011). Electromagnetic shielding of polymer–matrix composites with metallic nanoparticles. *Composites Part B: Engineering*, 42(6), 1420-1426.
- Kalaitzidou, K., Fukushima, H., & Drzal, L. T. (2007). A new compounding method for exfoliated graphite–polypropylene nanocomposites with enhanced flexural properties and lower percolation threshold. *Composites Science and Technology*, 67(10), 2045-2051.
- Kalia, S., Kaith, B. S., & Kaur, I. (2009). Pretreatments of natural fibers and their application as reinforcing material in polymer composites—A review. *Polymer Engineering & Science*, 49(7), 1253-1272.
- Kevlar 29 is a registered trademark of E.I. duPont deNemours and Company, Inc., Wilmington, DE.
- Kevlar 49 is a registered trademark of E.I. duPont deNemours and Company, Inc., Wilmington, DE.
- Khashaba, U. A., Aljinaidi, A. A., & Hamed, M. A. (2014). Nanofillers modification of Epocast 50-A1/946 epoxy for bonded joints. *Chinese Journal of Aeronautics*, 27(5), 1288-1300.
- Kuchibhatla, S.V.N.T., Karakoti, A.S., Bera, D. & Seal S. (2007). One dimensional nanostructured materials. *Progress in Materials Science*, 52, 699-913.
- Lal, L. P. J., Ramesh, S., & Natarajan, E. (2018, April). Study on the repeatability of manufacturing nano-silica (SiO₂) reinforced composite laminates. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 346, No. 1, p. 012083). IOP Publishing.
- Liang, R., & Hota, G. (2009, November). Fiber reinforced polymer composites for civil infrastructures. In *Proceedings of the International Conference on FRP Composites for Infrastructure Applications, San Francisco, CA, USA* (Vol. 46).

- Liu, Y., Yang, J. P., Xiao, H. M., Qu, C. B., Feng, Q. P., Fu, S. Y., & Shindo, Y. (2012). Role of matrix modification on interlaminar shear strength of glass fibre/epoxy composites. *Composites Part B: Engineering*, 43(1), 95-98.
- Madenci, E., Özkılıç, Y. O., & Gemi, L. (2020). Buckling and free vibration analyses of pultruded GFRP laminated composites: Experimental, numerical and analytical investigations. *Composite Structures*, 254, 112806.
- Madenci, E., Özkılıç, Y. O., & Gemi, L. (2020). Experimental and theoretical investigation on flexure performance of pultruded GFRP composite beams with damage analyses. *Composite Structures*, 112162.
- Madenci, E., Özkılıç, Y. O., & Gemi, L. (2020). Theoretical Investigation on Static Analysis of Pultruded GFRP Composite Beams. *Akademik Platform Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, 8(3), 483-490.
- Mintmire, J. W., & White, C. T. (1995). Electronic and structural properties of carbon nanotubes. *Carbon*, 33(7), 893-902.
- Montazeri, A., Javadpour, J., Khavandi, A., Tcharkhtchi, A., & Mohajeri, A. (2010). Mechanical properties of multi-walled carbon nanotube/epoxy composites. *Materials & Design*, 31(9), 4202-4208.
- Morkavuk, S., Köklü, U., Bağcı, M., & Gemi, L. (2018). Cryogenic machining of carbon fiber reinforced plastic (CFRP) composites and the effects of cryogenic treatment on tensile properties: A comparative study. *Composites Part B: Engineering*, 147, 1-11.
- Nadler, M., Werner, J., Mahrholz, T., Riedel, U., & Hufenbach, W. (2009). Effect of CNT surface functionalisation on the mechanical properties of multi-walled carbon nanotube/epoxy-composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 40(6-7), 932-937.
- Nayak, R. K., Dash, A., & Ray, B. C. (2014). Effect of epoxy modifiers ($\text{AlO}_3/\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$) on mechanical performance of epoxy/glass fiber hybrid composites. *Procedia materials science*, 6, 1359-1364.
- Omranı, A., Simon, L. C., & Rostami, A. A. (2009). The effects of alumina nanoparticle on the properties of an epoxy resin system. *Materials Chemistry and Physics*, 114(1), 145-150.
- Onat, A. (2015). Kompozit malzemeler ders notu. *Sakarya Meslek Yüksekokulu Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü Metalurji Programı*.
- Özkılıç, Y. O., Madenci, E., & Gemi, L. (2020). Tensile and compressive behaviors of the pultruded GFRP lamina. *Turkish Journal of Engineering (TUJE)*, 4(4), 169-175.
- Peigney, A., Laurent, C., Flahaut, E., Bacsá, R. R., & Rousset, A. (2001). Specific surface area of carbon nanotubes and bundles of carbon nanotubes. *Carbon*, 39(4), 507-514.

- Rana, S., Alagirusamy, R., & Joshi, M. (2011). Development of carbon nanofibre incorporated three phase carbon/epoxy composites with enhanced mechanical, electrical and thermal properties. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 42(5), 439-445.
- Ruoff, R. S., Qian, D., & Liu, W. K. (2003). Mechanical properties of carbon nanotubes: theoretical predictions and experimental measurements. *Comptes Rendus Physique*, 4(9), 993-1008.
- Saba, N., Tahir, P., & Jawaid, M. (2014). A review on potentiality of nano filler/natural fiber filled polymer hybrid composites. *Polymers*, 6(8), 2247-2273.
- Sahin, Y. (2006). Kompozit Malzemelere Giriş. *Seçkin Yayıncılık San. ve Tic. AŞ*, 424-430.
- Sharmila, T. B., Antony, J. V., Jayakrishnan, M. P., Beegum, P. S., & Thachil, E. T. (2016). Mechanical, thermal and dielectric properties of hybrid composites of epoxy and reduced graphene oxide/iron oxide. *Materials & Design*, 90, 66-75.
- Sheikh-Ahmad, J. Y. (2009). *Machining of polymer composites* (Vol. 387355391). New York: Springer.
- Siddiqui, N. A., Khan, S. U., & Kim, J. K. (2013). Experimental torsional shear properties of carbon fiber reinforced epoxy composites containing carbon nanotubes. *Composite Structures*, 104, 230-238.
- Siddiqui, N. A., Sham, M. L., Tang, B. Z., Munir, A., & Kim, J. K. (2009). Tensile strength of glass fibres with carbon nanotube-epoxy nanocomposite coating. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 40(10), 1606-1614.
- Silva, H., Ferreira, J. A. M., Capela, C., & Richardson, M. O. W. (2014). Mixed mode interlayer fracture of glass fiber/nano-enhanced epoxy composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 64, 211-222.
- Subhani, T., Latif, M., Ahmad, I., Rakha, S. A., Ali, N., & Khurram, A. A. (2015). Mechanical performance of epoxy matrix hybrid nanocomposites containing carbon nanotubes and nanodiamonds. *Materials & Design*, 87, 436-444.
- Tarakçioğlu, N., Gemi, L., & Yapıcı, A. (2005). Fatigue failure behavior of glass/epoxy±55 filament wound pipes under internal pressure. *Composites science and technology*, 65(3-4), 703-708.
- Tarfaoui, M., Lafdi, K., & El Moumen, A. (2016). Mechanical properties of carbon nanotubes based polymer composites. *Composites Part B: Engineering*, 103, 113-121.

- Thostenson, E. T., & Chou, T. W. (2002). Aligned multi-walled carbon nanotube-reinforced composites: processing and mechanical characterization. *Journal of physics D: Applied physics*, 35(16), L77.
- Thostenson, E. T., & Chou, T. W. (2003). On the elastic properties of carbon nanotube-based composites: modelling and characterization. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 36(5), 573.
- Treacy, M. J., Ebbesen, T. W., & Gibson, J. M. (1996). Exceptionally high Young's modulus observed for individual carbon nanotubes. *nature*, 381(6584), 678.
- Turgut, T., Kayran, A., Alemdaroğlu, N., & Ceylan, M. (2007). Vakum Torbalama Yöntemi İle Kompozit Malzemeden Yapı Üretimi Örnek Bir Havacılık Uygulaması. *Mühendis ve Makine Dergisi*, 48(566), 14-21.
- Türkmen, İ., & Köksal, N. S. (2012). Cam elyaf takviyeli polyester matrisli kompozit malzemelerde (CTP) elyaf tabaka sayısına bağlı mekanik özelliklerin ve darbe dayanımının incelenmesi-*Investigation Of mechanical properties and impact strength depending on the number of fibre layers in gl. Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi; Vol 8, No 2 (2012).*
- 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.
- Vasić, Z., Maksimović, S., & Georgijević, D. (2018). Applied integrated design in composite UAV development. *Applied Composite Materials*, 25(2), 221-236.
- Wang, C. H., Du, H. Y., Tsai, Y. T., Chen, C. P., Huang, C. J., Chen, L. C., ... & Shih, H. C. (2007). High performance of low electrocatalysts loading on CNT directly grown on carbon cloth for DMFC. *Journal of Power Sources*, 171(1), 55-62.
- Wei, B., Cao, H., & Song, S. (2011). Surface modification and characterization of basalt fibers with hybrid sizings. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 42(1), 22-29.
- Xie, S., Li, W., Pan, Z., Chang, B., & Sun, L. (2000). Mechanical and physical properties on carbon nanotube. *Journal of Physics and Chemistry of solids*, 61(7), 1153-1158.
- Yao, X. F., Zhou, D., & Yeh, H. Y. (2008). Macro/microscopic fracture characterizations of SiO₂/epoxy nanocomposites. *Aerospace science and technology*, 12(3), 223-230.
- Yazıcı M., Ülkü S., (2003), İki boyutlu rasgele dağılı E-Cam lifi/polyester matris kompozitlerde yükleme hızının mukavemet üzerine etkisinin incelenmesi. *Uludağ Üniversitesi Müh. Mimarlık Fak. Dergisi*, Cilt 8, Sayı 1.

- Yazman, Ş. (2018). Karbon nanotüp ve seramik nanopartikül takviyeli hibrit nanokompozit yapıştırıcıların mekanik özelliklerinin incelenmesi, Doktora Tezi. *Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- Yazman, Ş., Gemi, L., Uludağ, M., & Dışpınar, D. (2015). Investigation of the effect of carbon nanotube ratio on the wear behavior of carbon nanotube/epoxy nanocomposites. *International Journal of Enhanced Research in Science, Technology & Engineering*, 4(7), 201-207.
- Yıldızhan, H. (2008). Polimer matrisli kompozitlerin mekanik özelliklerinin incelenmesi, Süleyman Demirel Üniversitesi. *Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Eğitimi Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, Isparta*.
- Yöney, H. (2007). El Yatırma Yöntemi ile Elyaf Takviyeli Kompozit Yapıların Üretilmesi ve Özellikleri. *Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi*, 177.
- Yu, M. F., Files, B. S., Arepalli, S., & Ruoff, R. S. (2000). Tensile loading of ropes of single wall carbon nanotubes and their mechanical properties. *Physical review letters*, 84(24), 5552.
- Yu, M. F., Lourie, O., Dyer, M. J., Moloni, K., Kelly, T. F., & Ruoff, R. S. (2000). Strength and breaking mechanism of multiwalled carbon nanotubes under tensile load. *Science*, 287(5453), 637-640.
- Zhang, X., Xu, W., Xia, X., Zhang, Z., & Yu, R. (2006). Toughening of cycloaliphatic epoxy resin by nanosize silicon dioxide. *Materials Letters*, 60(28), 3319-3323.
- Zheng, Y., Ning, R., & Zheng, Y. (2005). Study of SiO₂ nanoparticles on the improved performance of epoxy and fiber composites. *Journal of reinforced Plastics and Composites*, 24(3), 223-233.
- Zhou, Y. X., Wu, P. X., Cheng, Z. Y., Ingram, J., & Jeelani, S. (2008). Improvement in electrical, thermal and mechanical properties of epoxy by filling carbon nanotube. *Express polymer letters*, 2(1), 40-48.
- Zhou, Y., Pervin, F., Lewis, L., & Jeelani, S. (2008). Fabrication and characterization of carbon/epoxy composites mixed with multi-walled carbon nanotubes. *Materials Science and Engineering: A*, 475(1-2), 157-165.