T.C.
HARRAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Al_2O_3 NANOPARTİKÜL KATKILI ARAMİD ELYAF TAKVİYELİ EPOKSİ KOMPOZİTLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİ

Gökhan DEMİRCAN

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ŞANLIURFA

2018

Prof. Dr. Murat KISA danışmanlığında, Gökhan DEMİRCAN'ın hazırladığı **"Al_2O_3 Nanopartikül Katkılı Aramid Elyaf Takviyeli Epoksi Kompozitlerin Mekanik Özellikleri"** konulu bu çalışma 19/12/2018 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Harran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

İmza

Danışman : Prof. Dr. Murat KISA ……

Üye : Doç. Dr. Mustafa ÖZEN ……

Üye : Doç. Dr. Ahmet ERKLİĞ ……

Bu Tezin Makina Mühendisliği Anabilim Dalında Yapıldığını ve Enstitümüz Kurallarına Göre Düzenlendiğini Onaylarım.

Prof. Dr. Halil Murat ALĞIN
Enstitü Müdürü

Bu çalışma HÜBAK Tarafından Desteklenmiştir.
Proje No: 18002

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak gösterilmeden kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖZET i
ABSTRACT ii
TEŞEKKÜR iii
ŞEKİLLER DİZİNİ iv
ÇİZELGELER DİZİNİ v
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ vi
1. GİRİŞ 1
1.1. Tezin Önemi ve Amacı 1
1.2. Tezin Kapsamı 1
1.3. Tezin Katkısı ve Getireceği Yenilikler 3
1.4. Nanokompozitler 4
1.4.1. Metal matrisli nanokompozitler 4
1.4.2. Seramik matrisli nanokompozitler 5
1.4.3. Polimer matrisli nanokompozitler 6
1.4.3.1. Çözelti döküm üretim yöntemi 7
1.4.3.2. Eriyik karıştırma üretim yöntemi 8
1.4.3.3. İn situ polimerizasyon üretim yöntemi 9
1.5. Nanokompozit Uygulama Alanları 10
1.6. Nanopartiküller 11
1.6.1. Karbon tabanlı nanopartiküller 11
1.6.2. Metal tabanlı nanopartiküller 12
1.6.3. Seramik tabanlı nanopartiküller 12
1.7. Nanopartiküllerin Yüzey Modifikasyonu 13
1.7.1. Metal oksit nanopartiküllerin yüzey modifikasyonu 14
1.7.2. Silan bağlayıcı ajanları 14
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR 16
3. MATERYAL ve YÖNTEM 26
3.1. Materyal 26
3.2. Yöntem 27
3.2.1. Nanopartiküllerin yüzey modifikasyonu 27
3.2.2. Modifiye edilmiş nanopartikülleri epoksi ile birleştirme yöntemi 30
3.2.3. Vakum destekli reçine infüzon yöntemi kullanılarak kompozit plaka üretimi 34
3.2.4. Modifiye edilmiş nanopartikülleri aramid elyaf ile birleştirme yöntemi 37
3.2.5. Yöntemlerin birleştirilmesi 39
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA 41
4.1. Deneyler 41
4.1.1. Çekme deneyi 42
4.1.2. Basma deneyi 49
4.1.3. Eğilme deneyi 53
4.1.4. Charpy darbe deneyi 57
5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER 62
5.1. Sonuçlar 62
5.2. Öneriler 66
KAYNAKLAR 68
ÖZGEÇMİŞ 73

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

Al_2O_3 NANOPARTİKÜL KATKILI ARAMİD ELYAF TAKVİYELİ EPOKSİ KOMPOZİTLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİ

Gökhan DEMİRCAN

Harran Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Murat KISA
Yıl: 2018, Sayfa: 73

Elyaf takviyeli polimer kompozitler uzay, otomotiv, deniz, havacılık gibi yüksek performans isteyen yerlerde yaygın olarak kullanılırlar. Bu kompozitler alüminyum ve çelik gibi geleneksel malzemelere kıyasla yüksek dayanım, korozyon direnci ve hafiflik gibi avantajlar sağlamaktadır. Özellikle karbon, cam ve aramid elyaflarla takviye edilmiş termoset kompozitler, mühendislik cihazları, makinalar ve yapılarda geniş bir kabul görmüştür. Kullanılan elyaflar içinde aramid elyafın yüksek dayanım değerlerine sahip olması, hafifliği, yüksek sıcaklığa dayanıklı ve kimyasallara karşı dirençli olması bu elyafları en ilgi çekici elyaflardan biri haline getirmiştir. Son zamanlarda elyaf takviyeli polimer kompozitlerin mekanik özelliklerini arttırmak için çeşitli çalışmalar yapılmaktadır. Matris malzemelerinin çeşitli seramik nanopartiküller ile birleştirilmesi bu konudaki umut verici yaklaşımlardan birisidir. Bu seramik nanopartiküllerden alümina'nın (Al_2O_3) yüksek dayanım değerleri, oksidasyona karşı direnci ve ısıya ve sıcaklığa karşı yüksek dirence sahip olması bu partikülleri önemli bir katkı malzemesi haline getirmiştir. Bu çalışmada katkı malzemesi olarak silan bağlayıcı ajanı ile modifiye edilmiş alümina nanopartikülleri kullanılarak iki farklı yöntemle aramid elyaf takviyeli kompozitler üretilmiş ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Birinci yöntemde modifiye edilmiş nanopartiküller epoksiye göre kütlece %1, %2, %3, %4 ve %5 oranında epoksi reçinesine homojen bir şekilde dağıtılmış ve bu epoksi reçinesi ile saf aramid elyaflar kullanılarak nanokompozitler üretilmiştir. İkinci yöntemde modifiye edilmiş nanopartiküller epoksiye göre kütlece %1, %2, %3, %4 ve %5 oranında elyaf malzemesinin yüzeyine eklenmiş ve bu elyaflarla saf epoksi reçinesi birleştirilerek nanokompozitler üretilmiştir. Üretilen bu nanokompozitlerin mekanik özellikleri incelendikten sonra her iki yöntem birleştirilerek nanokompozitin mekanik özellikleri daha da arttırılmaya çalışılmıştır. Bunun için gerilme değerlerinin maksimum olduğu %4 katkılı aramid elyaf ile %1 katkılı epoksi reçinesi birleştirilmiş ve yeni bir nanokompozit üretilmiştir. Ayrıca nanopartikül modifiye işleminin olumlu sonuç verip vermediğini gözlemlemek için aynı oranlar kullanılarak modifiye edilmemiş nanopartiküller ile başka bir nanokompozit üretilmiştir. Sonuç olarak modifikasyon işleminin maksimum birim şekil değiştirme, elastisite modülü ve tokluk değerlerini arttırdığı gözlemlenmiş ve ayrıca yöntemleri birleştirmenin maksimum birim şekil değiştirme ve tokluk değerlerine olumlu katkıda bulunduğu tespit edilmiştir.

ANAHTAR KELİMELER: Nanopartikül, Al_2O_3, Kompozit, Aramid, Mekanik özellikler

ABSTRACT

MSc Thesis

MECHANICAL PROPERTIES OF AL_2O_3 NANOPARTICLES FILLED ARAMID FIBER REINFORCED EPOXY COMPOSITES

Gökhan DEMİRCAN

Harran University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Murat KISA
Year: 2018, Page: 73

Fiber-reinforced polymer composites are widely used in high-performance areas such as space, automotive, marine, aerospace. These composites provide advantages such as high strength, corrosion resistance and light weight compared to conventional materials such as aluminum and steel. Thermoset composites, especially reinforced with carbon, glass and aramid fibers, have received wide acceptance in engineering devices, machines and structures. High strength values, lightness, high temperature resistance and resistance to chemicals of aramid fibers make these fibers one of the most attractive fibers. Recently, various studies have been carried out to enhance the mechanical properties of fiber-reinforced polymer composites. Combining matrix materials with various ceramic nanoparticles is one of the promising approaches. Alumina (Al_2O_3), one of these ceramic nanoparticles, has high resistance, oxidation and heat resistance properties. In this study, aramid fiber reinforced composites were produced with two different methods by using silane coupling agent modified alumina nanoparticles and their mechanical properties were investigated. In the first method, the modified nanoparticles were homogeneously dispersed to the epoxy resin by 1%, 2%, 3%, 4% and 5% by mass, and nanocomposites were produced using pure aramid fibers with this epoxy resin. In the second method, the modified nanoparticles were added to the surface of the fiber material by 1%, 2%, 3%, 4% and 5% by mass, and the nanocomposites were produced by combining the pure epoxy resin with these fibers. After the mechanical properties of these produced nanocomposites were investigated, the mechanical properties of the nanocomposites were tried to be increased by combining both methods. For this purpose, 4% wt Al_2O_3 addition to aramid fiber and 1% wt Al_2O_3 addition to epoxy resin were combined and a new nanocomposite was produced. In addition, another nanocomposite was produced with unmodified nanoparticles using the same ratios in order to observe whether the nanoparticle modified procedure yielded positive results. As a result, it was observed that the modifying process increases the strain, modulus of elasticity and toughness values, and it has also been determined that combining the methods contributes to the strain and toughness values.

KEY WORDS: Nanoparticle, Al_2O_3, Composite, Aramid, Mechanical properties

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez çalışması boyunca konu seçiminden yazım aşamasına kadar bilgi birikimi ve tecrübeleri ile beni yönlendiren, değerli bilgilerini benden esirgemeyen, danışman hocam, Harran Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Öğretim Üyesi Prof. Dr. Murat KISA'ya en içten teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Tez çalışması boyunca, özellikle laboratuvar çalışmalarında sahip olduğu tecrübeleri ve engin bilgileriyle beni yönlendiren saygıdeğer hocam, Harran Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Öğretim Üyesi Doç. Dr. Mustafa ÖZEN'e verdiği emeklerinden dolayı en içten duygularımla minnettarım.

Çalışmalarım boyunca değerli bilgilerini benden esirgemeyen Harran Üniversitesi Kimya Bölümü Öğretim Üyesi Prof. Dr. Mustafa DEĞİRMENCİ ve Harran Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü Öğretim Üyesi Doç. Dr. Bülent AKTAŞ hocalarıma, laboratuvar çalışmalarında bana yardımcı olan Makine Mühendisi Mehmet Ali KURT'a teşekkür ederim.

Çalışmanın yapılabilmesi için gerekli maddi desteği sağlayan HÜBAK birimine teşekkür ederim.

Tüm çalışmam boyunca her zaman yanımda olup manevi desteğini benden esirgemeyen sevgili eşime teşekkür ederim.

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1.1. Lif takviyeli metal matrisli karbon nanotüp kompozitin şeması 5
Şekil 1.2. Nanokompozit yayın sayıları ile ilgili basit istatistikler (PubMed, 26/07/2017)..... 7
Şekil 1.3. Çözelti döküm üretim yönteminin şeması (Nixon, 2016) 8
Şekil 1.4. Eriyik karıştırma üretim yönteminin şeması (Nixon, 2016)..... 9
Şekil 1.5. İn situ polimerizasyon üretim yönteminin şeması..... 10
Şekil 1.6. Nano seviyedeki ana karbon çeşitleri..... 12
Şekil 1.7. Silan bağlayıcı ajanı bağlanma modeli (Shin-Etsu Chemical Co., Ltd.) 15
Şekil 3.1.a. Silan bağlayıcı ajanı b. Nanopartikül c. Tetrahidrofuran..... 27
Şekil 3.2.a. Manyetik karıştırıcı b. Ultrasonik karıştırıcı 28
Şekil 3.3. Modifiye işleminden sonra nanopartiküllerin tabaka formundaki hali..... 29
Şekil 3.4. Nanopartiküllerin bilyalı değirmende öğütülmesi..... 29
Şekil 3.5. Bilyalı değirmenden geçirilmiş toz halindeki modifiye edilmiş nanopartiküller 30
Şekil 3.6. Modifiye edilmiş nanopartiküllerin ölçülerek epoksi reçinesine eklenmesi 31
Şekil 3.7. Modifiye edilmiş nanopartikül katkılı epoksinin manyetik karıştırıcıda karıştırılması..... 32
Şekil 3.8. Epoksinin koyulduğu buz banyosu 33
Şekil 3.9. Vakum gaz alma odasında epoksinin içerisindeki kabarcıkların giderilmesi..... 34
Şekil 3.10. Belirlenen ebatlarda kesilen 8 kat aramid kumaşlar..... 35
Şekil 3.11.a. Kalıp ayırıcı filmin yerleştirilmesi b. Aramid elyafların yerleştirilmesi 36
Şekil 3.12.a. Beyaz soyma kumaşının yerleştirilmesi b. Yeşil infüzyon filesinin yerleştirilmesi 36
Şekil 3.13. Epoksi infüze edilmeye hazır VARTM tezgâhı 37
Şekil 3.14. Modifiye edilmiş nanopartikül katkılı çözeltinin döküldüğü kap 38
Şekil 3.15. Aramid elyafları modifiye etmek için kurulan sistem..... 39
Şekil 4.1. Üretilen nanokompozit plaka örneği..... 41
Şekil 4.2. Çekme deneyi numuneleri..... 43
Şekil 4.3. Çekme deneyi..... 43
Şekil 4.4. Nanokompozitlerin çekme deneyindeki maksimum gerilme grafiği..... 44
Şekil 4.5. Nanokompozitlerin çekme deneyindeki maksimum birim şekil değiştirme grafiği..... 46
Şekil 4.6. Nanokompozitlerin çekme deneyindeki elastisite modülü grafiği 47
Şekil 4.7. Nanokompozitlerin çekme deneyindeki tokluk grafiği 48
Şekil 4.8. Basma deneyi numuneleri 49
Şekil 4.9. Basma deneyi 50
Şekil 4.10. Nanokompozitlerin basma deneyindeki maksimum gerilme grafiği..... 51
Şekil 4.11. Nanokompozitlerin basma deneyindeki maksimum birim şekil değiştirme grafiği 52
Şekil 4.12. Eğilme deneyi numuneleri 53
Şekil 4.13. Üç nokta eğilme deneyi..... 54
Şekil 4.14. Nanokompozitlerin eğilme deneyindeki maksimum gerilme grafiği 55
Şekil 4.15. Nanokompozitlerin eğilme deneyindeki sehim grafiği 56
Şekil 4.16. Darbe deneyi numuneleri 57
Şekil 4.17. Darbe deneyi test cihazı 58
Şekil 4.18. Darbe deneyi numune test doğrultuları 59
Şekil 4.19. Nanokompozitlerin darbe deneyindeki darbe enerjisi grafiği 60

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa No

Çizelge 1.1. Seramik nanokompozitlerin üretim metotlarının avantaj ve sınırlandırmaları 6
Çizelge 2.1. Literatür çalışmalarının özet hali..... 22
Çizelge 3.1. Alüminyum oksit (Al_2O_3) nanopartikülün teknik özellikleri..... 26
Çizelge 3.2. Reçine ve sertleştiricinin teknik özellikleri 26
Çizelge 3.3. Aramid elyaf teknik özellikleri 27
Çizelge 3.4. Üretilen 13 adet nanokompozit plaka..... 40
Çizelge 4.1. Yapılan deneylerin standartları 41
Çizelge 4.2. Nanokompozitlerin çekme deneyindeki maksimum gerilme değerleri 44
Çizelge 4.3. Nanokompozitlerin çekme deneyindeki birim şekil değiştirme değerleri 45
Çizelge 4.4. Nanokompozitlerin çekme deneyindeki elastisite modülü değerleri..... 46
Çizelge 4.5. Nanokompozitlerin çekme deneyindeki tokluk değerleri..... 47
Çizelge 4.6. Nanokompozitlerin basma deneyindeki maksimum gerilme değerleri 50
Çizelge 4.7. Nanokompozitlerin basma deneyindeki maksimum birim şekil değiştirme değerleri..... 51
Çizelge 4.8. Nanokompozitlerin eğilme deneyindeki maksimum gerilme değerleri..... 55
Çizelge 4.9. Nanokompozitlerin eğilme deneyindeki sehim değerleri 56
Çizelge 4.10. Nanokompozitlerin darbe deneyindeki darbe enerjisi değerleri..... 60
Çizelge 4.11. Yöntemleri birleştirmede kullanılan veriler 62
Çizelge 4.12. Sadece lif ve epoksinin bütün özelliklerinin en iyi değerlerinin karşılaştırılması 63
Çizelge 4.13. Sadece lif ve epoksinin bütün özelliklerinin en iyi oranlarının karşılaştırılması..... 64
Çizelge 4.14. Yöntemlerin birleştirildiği veriler 65
Çizelge 4.15. Modifiye edilmemiş nanopartiküller ile üretilen nanokompozitin karşılaştırma verisi .. 66

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

VARTM	Vakum destekli reçine infüzyon yöntemi
ASTM	Amerikan test ve malzeme kurumu
M-	Modifiye edilmemiş nanopartikül kullanılarak yöntemlerin birleştirilmesi sonucu oluşturulmuş nanokompozit
M+	Modifiye edilmiş nanopartikül kullanılarak yöntemlerin birleştirilmesi sonucu oluşturulmuş nanokompozit
2D	2 boyutlu
ATH	Alümina trihidrit
Al_2O_3	Alüminyum oksit
ZnO	Çinko oksit
SiO_2	Silisyum dioksit
TiO_2	Titanyum dioksit
Fe_3O_4, Fe_2O_3	Demir oksit
MMK	Metal matrisli kompozitler
MMNK	Metal matrisli nanokompozitler
Al	Alüminyum
Cu	Bakır
Mg	Magnezyum
SMK	Seramik matrisli kompozitler
PNC	Polimer nanokompozitler
$CaCO_3$	Kalsiyum karbonat
KNT	Karbon nanotüp
TDKNT	Tek duvarlı karbon nanotüp
ÇDKNT	Çok duvarlı karbon nanotüp
UV	Ultraviyole
ZnO	Çinko oksit
ZnO_2	Çinko peroksit
CeO_2	Seryum oksit
SiH_4	Silan
Fe	Demir
TMA	Termomekanik analiz

1. GİRİŞ

1.1. Tezin Önemi ve Amacı

Elyaf takviyeli polimer kompozitler sahip oldukları üstün mekanik özelliklerinden dolayı, pek çok geleneksel metalik malzemelere kıyasla önemli ölçüde üstün bir performans göstermektedir. Bu kompozitlere nanopartikül ekleyerek mekanik özelliklerini arttırmak mümkündür.

Son zamanlarda nanoboyutlu malzemeler üzerinde yapılan çalışmalar bu malzemelerin geleceğe dair önemli teknolojilerden biri olduğunu göstermiştir. Bilim adamlarının bu konu üzerinde yoğunlaşmasının temel nedeni maddelerin nanoboyuta düşerken fiziksel özelliklerinden farklı olarak sıra dışı özellikler ve işlevsellik göstermeleridir. Nano malzemelere bu sıra dışı özellikleri kazandıran, boyutları nano seviyeye düşürülmüş partiküllere nanopartikül denir.

Bu çalışmada matris malzemesi olarak epoksi termoset polimeri, elyaf malzemesi olarak örgü aramid elyaflar, nanopartikül olarak da silan bağlayıcı ajanı ile modifiye edilmiş alümina (Al_2O_3) nanopartiküller kullanılmıştır.

Bu çalışmanın amacı literatürde kullanılan iki farklı yöntemle, nanokompozit üretimine giriş yapmak ve iki yöntemi de ayrı ayrı analiz ederek avantaj ve dezavantaj olan yönlerini irdeleyip avantajlı yönlerini birleştirerek daha yüksek mekanik özelliklere sahip yeni hibrid kompozitler üretmektir.

1.2. Tezin Kapsamı

Nanopartiküller boyutlarına göre sınıflandırılmaktadırlar. Çapları 2500 nm den büyük olan partiküller kaba partiküller olarak isimlendirilir ve bunlar bilinen manada nanopartikül özellikleri taşımazlar. Çapları 100 nm ile 2500 nm arasında olan partiküller küçük taneli partiküller olarak geçer fakat bunlar nanoteknolojinin

sağladığı yüksek özellikleri tam olarak sağlayamazlar. Çapları 100 nm'nin altında olan partiküller ise ultra küçük taneli partiküller olarak adlandırılır ve bunlar sahip oldukları yüksek optik, elektriksel ve mekanik özelliklerden dolayı tam manasıyla nanopartikül özellikleri taşırlar (Azmi ve Shad, 2017). Nanopartiküllerin sahip olduğu başka bir önemli özellik ise, kovalent ve kovalent olmayan bağlar ile ilgili olarak çekim kuvvetlerine sahip olmalarıdır. Bu eşsiz özellik, diğer partiküllere ve malzemelere oranla çok daha büyük yüzey alanı/kütle oranına sahip olmalarına dayanmaktadır ve bu özellik nanopartiküllerin emme ve emilme kabiliyetlerini arttırır (Borm ve Kreyling, 2004).

Bunlara örnek olarak metal ve metal oksit nanopartiküller gösterilebilir. Bu nanopartiküller elektronik, katalitik ve optik etkilerinden dolayı son yıllarda araştırmacıların dikkatini önemli ölçüde çekmiştir. Önemli nanopartiküllerden bazıları; çinko oksit (ZnO), silisyum dioksit (SiO_2), titanyum dioksit (TiO_2), alüminyum oksit (Al_2O_3) ve demir oksit (Fe_3O_4, Fe_2O_3) gibi oksit metallerdir (Esen, 2011).

Nanopartiküllerin yanı sıra, kompozit malzemelerin yapımında cam, karbon, aramid gibi elyaflar kullanılmaktadır. Bu elyaflar içinde özellikle aramid elyafın ısıya dayanıklı ve güçlü bir sentetik lif oluşu ve uzay araştırmaları, askeri amaçlar, kurşun geçirmez giysi ve balistik bileşimlerinde yaygın bir kullanım alanına sahip olması araştırmacıların ilgisini çekmektedir (Denchev ve Dencheva, 2012).

Kompozit yapımında aramid gibi elyafları bir arada tutmak için metal, seramik ve polimer gibi matris malzemeleri kullanılır. Bunlar arasında en yaygın kullanılanı maliyeti düşü ve şekil alması kolay polimer matris malzemeleridir. Polimer malzemeler monomer olarak adlandırılan küçük yapıların birbirlerine bağlanması ile oluşan uzun zincirli yapılardır.

Nanopartikül katkılı kompozitler yüksek mekanik özelliklerin arzulandığı alanlarda kullanılmaktadır. Bu kompozitlerin kullanımının yaygınlaştırılması, yeni kullanım alanlarının ve üretim tekniklerinin bulunması yüksek önem arz etmektedir.

Yapılan literatür taramalarında, yüksek mekanik özellikler sergileyen aramid elyaflar ve önemli seramiklerden biri olan Al_2O_3 nanopartiküllerin Vakum Destekli Reçine İnfüzyon Yöntemi ile bir araya getirilmesine yönelik çalışmaların çok az olduğu görülmüştür. Bu çalışmada alümina nanopartiküller (Al_2O_3) silan bağlayıcı ajanı ile modifiye edilerek, Vakum Destekli Reçine İnfüzyon Yöntemi ile aramid elyaf takviyeli epoksi kompozitler üretilmiştir. Üretim esnasında iki farklı yöntem kullanılmıştır. Birinci yöntemde nanopartiküller belirli oranlarda epoksi reçinesi içerisine katılmış ve bu epoksi reçinesi ile katkısız aramid elyaflar bir araya getirilerek nanokompozit üretilmiştir. İkinci yöntemde nanopartiküller belirli oranlarda aramid elyafa katılmış ve bu elyaflar ile katkısız epoksi reçinesi bir araya getirilerek nanokompozit üretilmiştir. Son olarak her iki yöntemin en yüksek mekanik özelliklere sahip oranları alınarak iki yöntem birleştirilmeye çalışılmıştır.

Üretilen nanokompozitlerin mekanik özellikleri incelenmiş ve sonuçlar değerlendirilmiştir.

1.3. Tezin Katkısı ve Getireceği Yenilikler

Yapılan çalışmanın katkısı ve literatüre getireceği yenilikler aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

- Yapılan literatür taramalarında, yüksek mekanik özellikler sergileyen aramid elyaflar ve önemli seramiklerden biri olan Al_2O_3 nanopartiküllerin Vakum Destekli Reçine İnfüzyon Yöntemi ile bir araya getirilmesine yönelik çalışmaların sayısının çok az olduğu görülmüştür. Bu nedenle yapılan çalışmanın bu kapsamda literatürü aydınlatacağı düşünülmektedir.
- Bu yüksek lisans tezi HÜBAK'ın 18002 nolu entegre projesi kapsamında üretilmiştir. Nanopartikül takviyeli kompozitlerin Kimya Bölümü ve Makine Mühendisliği Bölümü öğretim elemanları tarafından üretilmesi, çalışma sonuçlarının multidisipliner alanlarda kullanılmasına imkân sağlayacaktır. Bu kapsamda yapılan çalışma multidisipliner çalışmaları teşvik edici niteliktedir.

- Daha önce denenmiş fakat bir arada kullanılmamış iki farklı yöntem bu çalışmada bir araya getirilmiş ve bunun avantajlı ve dezavantajlı yönleri incelenmiştir. İki farklı yöntemi birleştirmenin sonuçlarının literatüre önemli katkılarda bulunacağı düşünülmektedir.

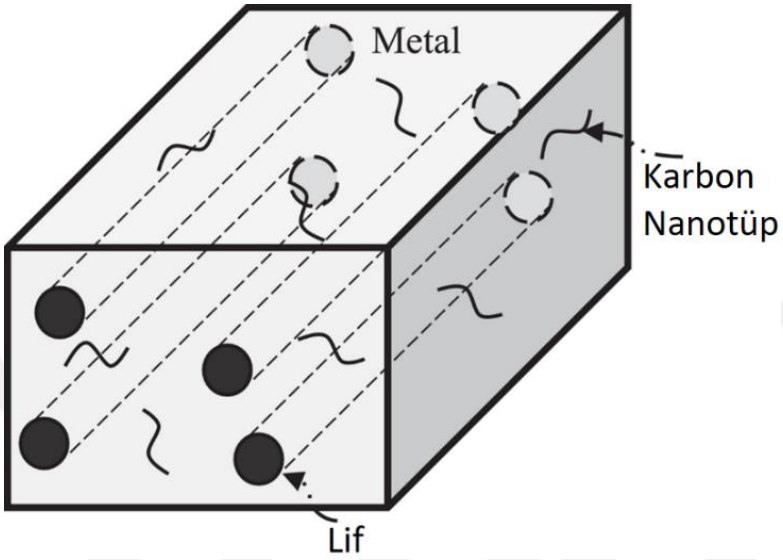
1.4. Nanokompozitler

Geleneksel kompozitler, iki veya daha fazla malzemenin her birinin en iyi özelliklerini harmanlamak amacıyla bir araya getirilmesi ile oluşturulur. Nanokompozitler ise iki veya daha fazla malzemenin en az birinin nanoboyutta (10^{-9} m) olmak şartı ile bir araya getirilmesi ile oluşur (Twardowski, 2007). Nanoboyuttaki malzemeler geniş yüzey alanına sahiptir. Bu yüzden mikro partiküllerden nanopartiküllere geçişte malzemenin özelliklerinde önemli ölçüde değişmeler meydana gelir. Nanopartiküllerin kullanılması ile kompozitlerin mekanik, elektriksel, manyetik, optik, termal özelliklerinde önemli ölçüde artış gözlemlenir. Nanokompozitler; metal matrisli nanokompozitler, seramik matrisli nanokompozitler ve polimer matrisli nanokompozitler olarak üç gruba ayrılır.

1.4.1. Metal matrisli nanokompozitler

Metal matrisli kompozitlerin (MMK) nanopartiküller ile takviye edilmesi ile metal matrisli nanokompozitler (MMNK) oluşur. Çok sayıda uygulama alanı için uygun olan bu kompozitler gelecek vaat eden kompozit malzemelerdir. Nanopartiküller, matris malzemelerini; aşınma direnci, sönümleme özellikleri ve mekanik mukavemet bakımından geliştirebilir (Zhang ve Chen, 2008; Deng ve ark., 2007). Al, Mg ve Cu gibi bazı metaller; karbürler, nitrürler, oksitler ve karbon nanotüpler gibi seramik nano partiküller ile kullanılarak nanokompozitler üretilebilir. Bu malzemelerin sentezlenmesindeki temel sorun, takviye fazının, erimiş metal tarafından düşük ıslatılabilirliğinden meydana gelmekte olup, bu, geleneksel döküm yöntemleriyle senteze izin vermemektedir. Nanokompozitlerin üretimi için literatürde çeşitli alternatif yollar sunulmuştur. Üretim yöntemleri iki ana gruba ayrılabilir: ex situ ve in situ. Ex situ sentez yolu, sıvı veya toz haline getirilmiş metallere nano-takviye

katmaktan oluşur. İn situ proseslerde ise işlem sırasında reaksiyonla beraber oluşmuş seramik nanobileşikler kullanılır (Casati and Vedani, 2014). Ex situ yöntemi ile oluşturulmuş lif takviyeli metal matrisli bir nanokompozitin şeması Şekil 1.1.'de gösterilmiştir (Hassanzadeh-Aghdam ve ark., 2018).



Şekil 1.1. Lif takviyeli metal matrisli karbon nanotüp kompozitin şeması

1.4.2. Seramik matrisli nanokompozitler

Seramik matris kompozitler (SMK'ler) kompozit materyallerin bir alt grubu olmalarının yanı sıra bir seramik alt grubudurlar. Seramik bir matrise gömülü seramik liflerden oluşurlar. Matris ve lifler herhangi bir seramik materyalden oluşabilir, bu sayede karbon ve karbon fiberler de bir seramik materyal olarak düşünülebilir.

Seramikler iyi aşınma direncine, yüksek termal ve kimyasal kararlılığa sahiptirler. Ancak, kırılgandırlar. Bu bağlamda, seramiğin düşük tokluğu, endüstride daha geniş kullanımlar için engel teşkil etmektedir. Seramik-matris nanokompozitler sahip oldukları yüksek mekanik özelliklerden dolayı bu sınırlamanın üstesinden gelmektedir. Seramik matrisinde iplikler, lifler, levhalar veya partiküller gibi enerji tüketen bileşenlerin kullanılması, kırılma tokluğunun artmasına neden olabilir. Bu takviyeler çatlakları saptırır ve / veya köprüleme elemanları sağlar, çatlağın daha fazla açılmasını engeller (Camargo ve ark., 2009).

Seramik matris nanokompozitlerinin hazırlanması için birçok yöntem tarif edilmiştir. En yaygın metodolojiler, geleneksel toz yöntemi, polimer öncü metodu, püskürtme pirolizi, buhar teknikleri ve sol-jel prosesini içeren kimyasal yöntemlerdir. Çizelge 1.1.'de bazı metotlar, avantajları ve sınırlandırmalar yer almaktadır.

Çizelge 1.1. Seramik nanokompozitlerin üretim metotlarının avantaj ve sınırlandırmaları

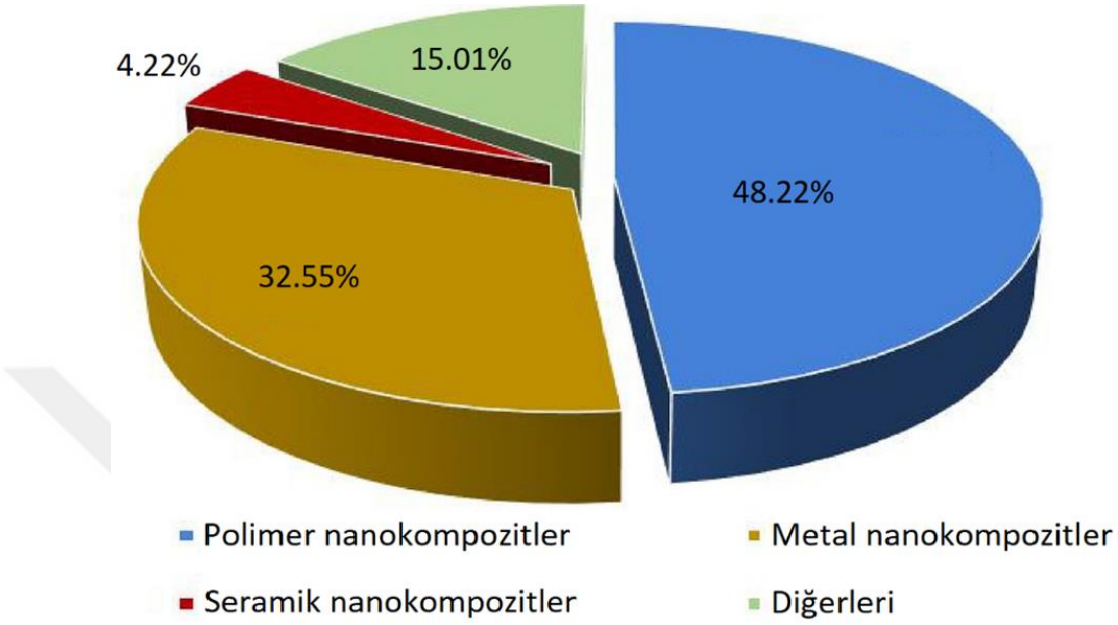
Metod	**Avantaj**	**Sınırlandırmalar**
Toz Metodu	Basit	Düşük oluşum hızı, yüksek sıcaklık, aglomerasyon, zayıf faz dispersiyonu, üründe sekonder faz oluşumu
Polimer Öncü Metodu	Daha ince parçacıklar hazırlama imkânı	Ultra ince parçacıkların aglomerasyonu ve dispersiyonundan dolayı homojen olmayan ve faz ayrımlı malzemeler oluşması
Sol-jel Metodu	Daha iyi takviye dispersiyonu	Basit, düşük işlem sıcaklığı; çok yönlü, yüksek kimyasal homojenlik; hassas stokiyometri kontrolü; yüksek saflıkta ürünler; metal-oksijen bağları içeren üç boyutlu polimerlerin oluşumu; tek veya çoklu matrisler

1.4.3. Polimer matrisli nanokompozitler

Polimer nanokompozitler (PNC), polimer matrisi içerisinde dağılmış nanopartiküller veya nanodolgulara sahip bir polimer veya kopolimerden oluşur. Bunlar levhalar, lifler, sferoidler gibi farklı şekillerde olabilirler. En basit durumda, bir polimer matrisine uygun şekilde nanopartiküllerin eklenmesi, nano ölçekli dolgu maddesinin niteliği ve özellikleri sayesinde, kompozitin performansını çoğunlukla dramatik olarak artırabilir (Evangelos, 2007).

Matris malzemesi olarak termoplastikler, termosetler ve elastomerler gibi neredeyse tüm polimerler, polimer nanokompozit oluşturmak için kullanılır. Takviye malzemesi olarak farklı şekillere sahip nanoboyutlu malzemeler kullanılır. Temel olarak nanokompozitleri hazırlamak için üç yöntem vardır. Bunlar: solvent dökümü, eriyik karıştırma ve yerinde polimerizasyon (Anandhan ve Bandyopadhyay, 2011).

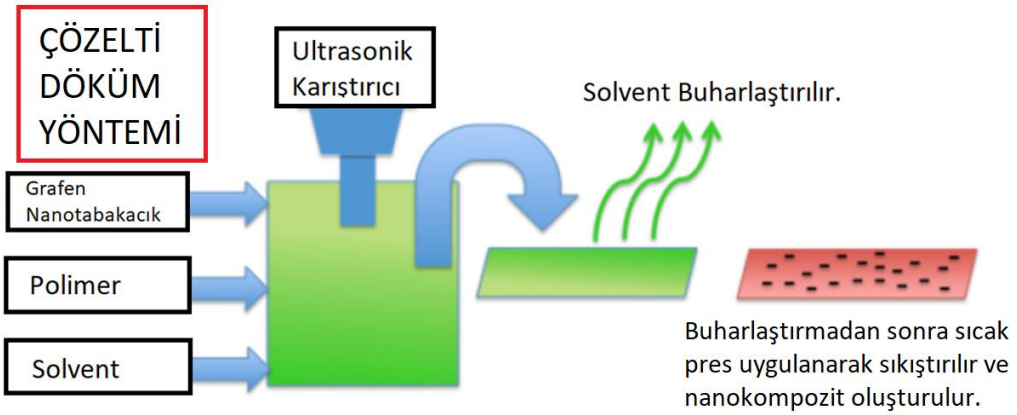
Polimer nanokompozitler diğer nanokompozitlere göre araştırmacıların daha çok ilgisini çekmiş ve bu ilgi yayın sayılarına yansımıştır. Şekil 1.2.'de yayın sayıları dağılımı pasta grafiği olarak verilmiştir (Kumar ve ark., 2018).



Şekil 1.2. Nanokompozit yayın sayıları ile ilgili basit istatistikler

1.4.3.1. Çözelti döküm üretim yöntemi

Nanokompozitlerin üretilmesi için çözelti döküm yöntemi nadiren kullanılır. Polimer matrisinin doğası gereği in-situ polimerizasyon ve eriyik birleştirme işlemlerinin uygun olmaması durumunda uygulanabilir. Bu yöntemde bir polimer, bir çözücü ve nano takviye edici birleştirilir ve ultrasonik olarak karıştırılır ve nanopartiküller polimerin içerisinde kalacak şekilde çözücünün buharlaşmasına izin verilir. Çözücü tamamen buharlaştırıldıktan sonra, geriye kalan nano takviyeli polimer sıcak bir presten geçirilerek sıkıştırılır ve nanokompozit oluşturulur. Şekil 1.3.'de üretim metodunun şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 1.3. Çözelti döküm üretim yönteminin şeması (Nixon, 2016)

1.4.3.2. Eriyik karıştırma üretim yöntemi

Eriyik karıştırma üretim yönteminde, ekstruder veya dahili bir karıştırıcı kullanılır. Polimer ve nano takviye, ekstrüdere eklenir ve bir süre yoğun karıştırma işlemine tabi tutulur ve kalıptan nanokompozit çıkartılır. Bu yöntemin birçok avantajı vardır. İlk olarak, organik çözücülerin yokluğu nedeniyle çevresel olarak iyi huyludur. İkincisi, ekstrüzyon, enjeksiyon kalıplama ve diğer polimer işleme teknikleri gibi geleneksel endüstriyel işlemlerle uyumludur, böylece kolayca ticarileştirilebilir. Aynı zamanda, yüksek ürün hacim ölçeklerinde farklı çeşitlilikle üretim mümkündür. Üçüncü olarak, bir ekstrüderdeki veya karıştırıcıdaki yüksek karıştırma ortamı, ticari bir in-situ polimerizasyon işlemine kıyasla daha yüksek oranda nanoparçacık yükünün dahil edilmesine izin verebilir.

Bununla birlikte, nano dolgu maddeleri ile polimerlerin doğrudan eriyik halinde birleştirilmesi, nanopartiküllerin eritilerek karıştırma sırasında daha büyük topaklanmalar oluşturma eğiliminin yüksek olmasından ötürü, çoğu sistem için sınırlı bir başarıya ulaşmıştır, bu da küçük boyutlarının avantajlarını azaltmaktadır. Ek olarak, eriyik halinde birleştirme üzerine polimer bozulması bazen şiddetlidir, özellikle termoset polimerler için uygun değildir. Şekil 1.4.'te üretim metodunun şematik gösterimi yapılmaktadır.



Şekil 1.4. Eriyik karıştırma üretim yönteminin şeması (Nixon, 2016)

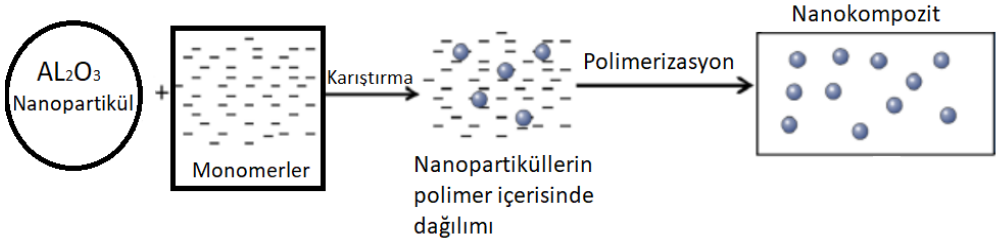
1.4.3.3. İn situ polimerizasyon üretim yöntemi

İn situ polimerizasyon yöntemi, Toyota araştırmacılarının 90'lı yılların başında polimerik nanokompozitlerin geliştirilmesine yönelik öncü çalışması sonucu ortaya çıkmıştır (Yano ve ark., 1993; Kojima ve ark., 1993).

İn situ polimerizasyon yönteminde nanokompozitler, nano dolgularla birleştirilmiş monomer veya prekürsörlerin polimerizasyonu ile üretilirler. Genellikle, nanopartiküller ilk olarak monomer veya prekürsörler ile karıştırılır ve daha sonra karışım uygun katalizör eklenerek polimerize edilir. Yerinde polimerizasyon teknolojisinin diğer yöntemlere göre avantajları şunlardır (Fukano ve Kageyama, 1975):

- Nanopartiküllerin sıvı monomerlere veya prekürsörlere doğrudan ve daha kolay dağılması, polimer matrisindeki nanopartiküllerin topaklanmasından kaçınılması ve iki faz arasındaki ara yüzey etkileşimlerinin geliştirilmesi.
- Daha ucuz nanopartiküllerin (örneğin silika parçacıkları yerine $CaCO_3$) ve geleneksel polimer işleme teknolojilerinin kullanılması olasılığı.

İn situ polimerizasyon üretim yönteminin şeması Şekil 1.5.'de açıklamalı bir şekilde verilmiştir.



Şekil 1.5. İn situ polimerizasyon üretim yönteminin şeması

1.5. Nanokompozit Uygulama Alanları

Bir nanokompozit, materyalin belirli bir özelliğini geliştirmek için içerisine nanopartiküllerin eklendiği bir kompozit türüdür. Nanokompozitlerin sahip oldukları üstün özellikler, araştırmacıları ve şirketleri bu malzemeyi çeşitli alanlarda kullanmayı düşünmelerine neden olmuştur. Bu alanlardan bazıları şöyledir:

- **Daha fazla güç çıkışı olan piller üretmek:** Silikon nanokürecikler ve karbon nanopartiküller ile oluşturulmuş bir kompozitten lityum iyon piller için anotlar üretilebilir. Silikon-karbon nanokompozitten oluşan anotlar, lityum elektrolit ile daha yakın temas ederek daha hızlı şarj veya güç boşalmasına olanak tanıyabilir.
- **Kırık kemikler için iyileşme sürecini hızlandırmak:** Bir nanotüp-polimer nanokompoziti, kemiğin büyümesini yönlendiren bir tür iskele olarak yerleştirildiğinde, kemiğin büyümesini hızlandırabilir.
- **Yüksek mukavemet-ağırlık oranına sahip yapısal bileşenler üretmek:** Kompozit rüzgâr türbini kanatları üretmek için karbon nanotüpler içeren bir epoksi kompozit kullanılabilir. Bu, türbin kanatlarının güçlü ve hafif olmasını sağlayarak üretilen elektrik miktarını arttırabilir.
- **Nanokompozitler kullanılarak hafif sensörler üretmek:** Polimer-nanotüp nanokompozitler elektrik iletirler. Ne kadar iyi iletebildikleri, nanotüplerin boşluklarına bağlıdır. Bu kompozitler türbin kanatları üzerine konulabilir. Kuvvetli rüzgâr, kanatları büktüğü zaman nanokompozit de eğilerek sensörün elektrik iletkenliğini değiştirip alarmın çalışmasına neden olabilir. Bu alarm, aşırı hasar oluşmadan önce rüzgâr türbininin kapanmasına sağlayabilir.
- **Esnek piller yapmak için nanokompozit kullanma**: Selüloz malzemeleri ve

nanotüpler kullanılarak iletken bir kâğıt üretilebilir. Bu iletken kâğıt bir elektrolit içine batırıldığında, esnek bir batarya oluşturulabilir.

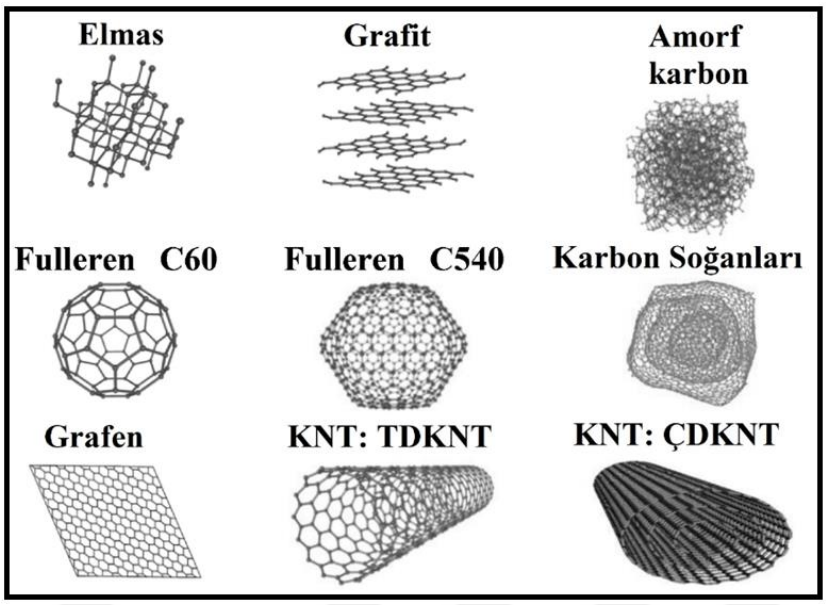
1.6. Nanopartiküller

Nanoteknoloji son yüzyılda popüler olmuş bir çalışma alanıdır. Nanoteknoloji ilk defa Richard P. Feynman (1960) tarafından gündeme getirilmiştir. O günden beri bu alan üzerine birçok çalışma yapılmıştır. Nanoteknolojinin temeli nanopartiküllere dayanır. Nanopartiküller nanometre boyutundaki ultra ince parçacıklardır. "Nano" demek on üzeri eksi dokuz demektir, başka bir ifade ile "Nano" milyarda biri ifade eden bir ön ektir. Nanopartiküllerin tanımı, ilgili malzemelere, alanlara ve uygulamalara bağlı olarak farklılık gösterir. Daha dar anlamda, katı malzemelerin fiziksel özelliklerinin kendiliğinden değişeceği 10–20 nm'den küçük parçacıklar olarak kabul edilirler. Öte yandan boyutları 1 nm'den 1µm'ye kadar olan bütün partiküller nanopartikül olarak adlandırılabilir. Birçok durumda ise 1 ila 100 nm arasındaki partiküller genellikle nanopartiküller olarak adlandırılır (Naito ve ark., 2018).

Nanopartiküller, morfolojilerine, boyutlarına ve kimyasal özelliklerine bağlı olarak çeşitli kategorilere ayrılır. Fiziksel ve kimyasal özelliklerine göre iyi bilinen nanopartikül sınıflarının bazıları aşağıda verilmiştir.

1.6.1. Karbon tabanlı nanopartiküller

Karbon genel olarak, kristal grafitler ve elmasların içerisinde bulunur. Bunların yanı sıra karbon nanotüpler ve fulleren gibi birçok farklı allotroplarda da bulunabilirler (Donohue, 1974). Karbon esaslı nanopartiküller, olağanüstü elektriksel, termal ve mekanik özelliklere sahiptirler. Bu yüzden mekanik olarak güçlendirilmiş hafif bileşenler, optik, nanoteller, sensörler ve diğer sistemler gibi çeşitli uygulamalar için nanokompozitlerin hazırlanmasında yaygın şekilde kullanılırlar (Miglietta ve ark., 2009). Sıfır boyuttan başlayarak bir boyutlu, iki boyutlu ve üç boyutlu karbon nanomalzemeler Şekil 1.6.'da gösterilmiştir (Săndulescu ve ark., 2015).



Şekil 1.6. Nano seviyedeki ana karbon çeşitleri

1.6.2. Metal tabanlı nanopartiküller

Metal nanopartiküller dökme metallere göre sahip oldukları sıra dışı özellikleri nedeniyle son zamanlarda araştırmacıların odak noktası olmuştur. Metal nanopartiküller, saf metallerden (örneğin altın, platin, gümüş, titanyum, çinko, seryum, demir ve talyum) veya bunların bileşiklerinden (örn., Oksitler, hidroksitler, sülfitler, fosfatlar, flüorürler ve kloritler) yapılan mikron altı ölçekli varlıklardır (Oberdörste ve ark., 2005).

Metal nanopartiküller, sentezlenebilmeleri ve kimyasal olarak modifiye edilebilmeleri nedeniyle ilginç sistemlerdir. Optik ve elektronik etkileri açısından metal nanopartiküller, küçük boyutlu dökme metallerin sahip oldukları optik sabitlere benzer optik özellikler sergiledikleri için diğer nano sistemlere göre önemli bir avantaj sunarlar (Fedlheim ve Foss, 2001).

1.6.3. Seramik tabanlı nanopartiküller

Seramik nanopartiküller, esas olarak metallerin oksitleri, karbürleri, fosfatları ve karbonatlarından ve kalsiyum, titanyum, silikon gibi metaloitlerden oluşurlar (Thomas

ve ark., 2015).

Seramik malzemelerin metal ve polimerler ile karşılaştırıldığında gösterdikleri benzersiz özellikleri nedeniyle son birkaç yılda çeşitli uygulamalarda kullanımı önemli ölçüde artmıştır. Sertlik, rijitlik, aşındırma tokluğu ve düşük yoğunluk bu malzemelerin üstün özelliklerindendir. Seramikler, "inorganik, metalik olmayan katılar" olarak tanımlanan bir malzeme sınıfıdır. Bilinen tüm materyallerin en geniş işlev alanına sahiptirler. Son yıllarda, benzersiz dielektrik, ferroelektrik, piezoelektrik, piroelektrik, ferromanyetik, manyetodirenç, iyonik, elektronik, süperiletken, elektrooptik ve gaz algılama özelliklerine dayanan fonksiyonel seramiklerin potansiyelinin önemli ölçüde arttığı görülmüştür (Khalil, 2012).

Alüminyum oksit (Al_2O_3), en çok kullanılan gelişmiş seramik malzemelerden biridir. Alüminyum oksit nanopartiküller yüksek sertlik ve yüksek boyutsal stabiliteye sahiptirler. Kauçuk, plastik ve seramiklerin; tokluk, aşınma direnci, termal yorulma direnci gibi özelliklerini iyileştirmek için kullanırlar. Diğer bazı kullanım alanları ise şöyledir:

- Kompozit malzeme yapımında mekanik özellikleri arttırmak için kullanılırlar.
- Çok ince polisaj için aşındırıcı olarak kullanılırlar.
- Isı yalıtımının istendiği yerlerde yansıtıcı olarak kullanılırlar.
- Nükleer santrallerin atık sularındaki radyonüklitlerin emilmesi için kullanılırlar.
- Gıda ve eczacılık ürünlerinin uzun süreli depolanması sırasında koruyucu atmosfer yaratmak için kurutucu olarak kullanılırlar.

1.7. Nanopartiküllerin Yüzey Modifikasyonu

Nanopartiküllerin özellikleri aynı kimyasal bileşimine sahip daha büyük ölçekteki partiküllere göre farklıdır. Bu nedenle, nanopartiküller üzerindeki araştırmalar hızla artmaktadır ve çok sayıda uygulama alanları mevcuttur. Bazı nanomateryaller mükemmel fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip olsa da belirli uygulamalar için uygun yüzey özelliklerine sahip değildirler. Sonuç olarak, bu tür

malzemelerin yüzeyini değiştirmek gerekebilir. Bunu yapmanın en yaygın yolu, uygun organik grupları yüzey atomlarına bağlamaktır (Neouze ve Schubert, 2008).

Yüzey modifikasyonun sağladığı bazı avantajları şöyle sıralayabiliriz:

- Yüzey modifikasyonu, nanopartikülleri topaklanmaya karşı stabilize edebilir (Grancharov ve ark., 2005).
- Farklı bir faz ile uyumlu hale getirmek için nanopartiküllerin yüzeyi modifiye edilebilir. Örneğin, uygun parçacıklar eklendiğinde metal parçacıkları suda çözünür hale getirilebilir (Doty ve ark., 2005).
- Başka bir örnek, organik polimerler içinde modifiye edilmiş inorganik nano dolgu maddelerinin kullanılmasıdır. Modifikasyon, iki faz arasındaki homojenlik ve uyumluluk sorunlarını önleyebilir ve böylece kompozitin mekanik özelliklerini iyileştirebilir (Moon ve ark., 2005).
- Nanopartikül modifikasyonunun başka bir avantajı ise kendi kendini organize etmesini sağlamaktır (Kickelbick ve Schubert, 2003). Basit organik gruplar, aglomerasyona karşı nanopartikülleri korumak için yeterli iken, parçacık yüzeyindeki fonksiyonel organik gruplar, nanopartiküllerin; moleküller, diğer nanopartiküller, yüzeyler veya katılar ile kasıtlı etkileşimini mümkün kılabilir.

1.7.1. Metal oksit nanopartiküllerin yüzey modifikasyonu

Metal oksit nanopartiküller, sahip oldukları üstün optik, manyetik ve mekanik özellikler nedeniyle araştırmacıların ilgi odağı olmuştur. Çeşitli metal nanopartiküller, tiyoller, karboksilik asitler ve aminler potansiyel metal oksit modifiye edicilerdir. Bununla birlikte, aminler ve tiyoller nadiren kullanılır. Metal oksit nanopartiküllerini modifiye etmek için kullanılan ana bileşikler fosfonatlar veya silanlardır.

1.7.2. Silan bağlayıcı ajanları

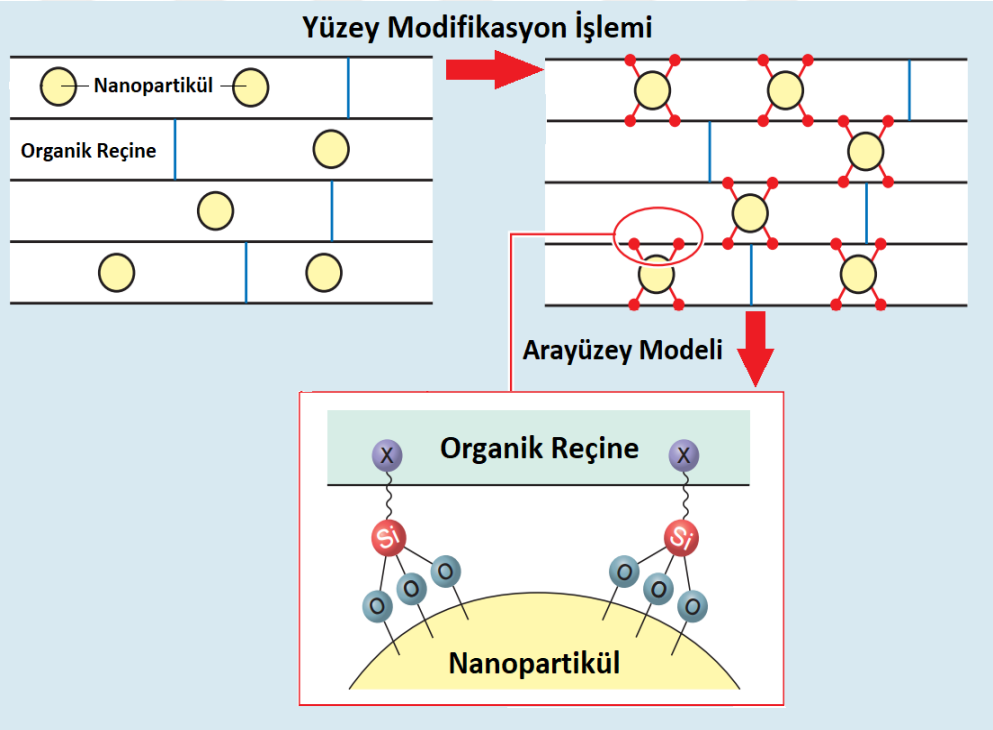
Silan bağlama ajanları, sahip oldukları fonksiyonel gruplar sayesinde hem organik hem de inorganik materyalleri birbirine bağlayan bileşiklerdir. Bir silan

bağlama ajan, organik materyalleri inorganik materyallere bağlayan bir çeşit arabulucu görevi görür. Bu karakteristik özellik sayesinde kompozit malzemelerin mekanik mukavemetini arttırmak, yapışma özelliğini geliştirmek, reçine modifikasyonunu ve yüzey modifikasyonunu iyileştirmek gibi işlemlerde kullanılırlar.

Silan bağlama ajanları, farklı reaktiviteye sahip iki fonksiyonel gruba sahip organosilikon bileşiklerdir. İki fonksiyonel gruptan biri organik maddeler ile ve diğeri inorganik maddeler ile reaksiyona girer. Genel yapısı Denklem 1.1.'deki gibidir:

$$R{-}(CH_2)n{-}Si{-}X_3 \qquad (1.1)$$

R, organik materyallerle bağlanan bir fonksiyonel grubu (vinil, epoksi, amino grubu vb.) simgeler. X, silanol oluşturmak için su veya nem ile hidrolize giren fonksiyonel bir grubu simgeler. Bu silanol inorganik materyallerle bağlanır. Şekil 1.7.'de örnek bir bağlanma şeması gösterilmiştir.



Şekil 1.7. Silan bağlayıcı ajanı bağlanma modeli (URL-1, 2018)

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Kumfu ve ark. (2008), mikro boyuttaki alümina (Al_2O_3) partikülleri kullanarak ultrasonik karıştırma ve el yatırma metodu ile aramid lif takviyeli epoksi kompozitler üretmiş ve bunların mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Sonuç olarak yaptıkları birtakım testlerle sertlik, darbe, aşınma ve çekme özelliklerinin olumlu yönde etkilendiğini gözlemlemişlerdir.

Akınyede ve ark. (2009), kütlece %2 oranında nano alümina ve fonksiyonlaştırılmış nano alümina partiküllerini örgü cam lif ve epoksi reçinesi ile ayrı ayrı modifiye edip vakum destekli reçine infüzyon yöntemini kullanarak lif takviyeli polimer kompozitler üretmiş ve bunların statik ve yorulma davranışlarını incelemişlerdir. Sonuç olarak modifiye işleminin kompozit üzerine önemli bir etkisi olmadığını gözlemlemişlerdir.

Zhang ve ark. (2010), nano silika ve nano titanya (SiO_2, TiO_2) partikülleri kütlece %2, %5, %8, %10 oranlarında kullanarak politetrafloroetilen ve kevların modifiye edilmesinden oluşmuş lif takviyeli fenolik kompozitleri el yatırma yöntemi ile üretmiş ve bunların aşınma özelliklerini incelemişlerdir. Sonuç olarak silika ve titanya nanopartikül katkılarının aşınma dayanımına önemli bir etkisinin olmadığı gözlemlenmiştir.

Ferreira ve ark. (2012), modifiye edilmiş nano kil partiküllerini kütlece %3 oranında kullanarak çok yönlü örgü kevlar takviyeli epoksi kompozitleri el yatırma yöntemi ile üretmiş ve bunların yorulma davranışlarını incelemişlerdir. Sonuç olarak nano kil katkısının statik dayanımı azalttığını ve hem eğilme hem de çekme yönündeki rijitliği arttırdığını, çekme yönündeki yorulma dayanımını %12 oranında arttırırken üç nokta eğmedeki yorulma dayanımını azalttığını gözlemlemişlerdir.

Raju ve ark. (2013), mikro alümina (Al_2O_3) partiküllerini kütlece %0, %5, %7.5 ve %10 oranlarında kullanarak örgü E-cam elyaf takviyeli epoksi kompozitleri el

yatırma metodu ile üretmişlerdir. Ürettikleri kompozitlerin çekme dayanımı, sertlik ve elastisite modülü gibi mekanik özelliklerine bakarak tribolojik davranışlarını incelemişlerdir. Mikro alümina katkısının mekanik özellikleri arttırdığını ve sürtünme katsayısını düşürücü yönde etki ettiğini gözlemlemişlerdir.

Kadhim ve ark. (2013), ortalama boyutları 50 nm olan Alümina (Al_2O_3) nanopartikülleri kütlece belirli oranlarda (%1, 2, 3, 4, 5, ve 7) epoksiye katarak önce manyetik karıştırıcıda karıştırmış ardından homojenizatör kullanarak nanokompozit oluşturmuşlardır. Oluşturdukları kompozitten ASTM standartlarına göre numuneler alıp 3 nokta eğme deneyi uygulamışlardır. Sonuç olarak maksimum eğilme dayanımının %4 değerinde oluştuğunu ve elastisite modülünün %7 değerine kadar sürekli arttığını gözlemlemişlerdir.

Harishanand ve ark. (2013), çinko oksit (ZnO), çinko peroksit (ZnO_2) ve seryum oksit (CeO_2) gibi nanometal oksitleri kütlece %0-3 oranında kullanarak epoksi kompozitler üretmiş ve mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Sonuç olarak yoğunluk, sertlik, çekme, eğilme, basma dayanımı değerlerinin %0.5 oranına kadar kayda değer bir gelişme göstermediğini ancak %1 oranında en iyi sonuçların seryum oksit (CeO_2) katkısında gerçekleştiğini gözlemlemişlerdir.

Reis ve ark. (2013), kütlece %1.5, %3, %6 oranlarında nano kil kullanarak kevlar lif takviyeli epoksi kompozitler üretmiş ve bunların darbe performansını incelemişlerdir. Araştırmacılar ara yüzeylerin arasındaki bağların ve partikül dağılımının daha iyi olması için silan bağlayıcı kullanmışlardır. Sonuç olarak nano kil katkısının genel olarak darbe performansını arttırdığını ve en iyi sonucun %6 oranında oluştuğunu gözlemlemişlerdir.

Taraghi ve ark. (2014), çok duvarlı karbon nanotüpleri kütlece %0.3, %0.5, %1 oranında kullanarak örgü kevlar lif takviyeli epoksi kompozitleri el yatırma yöntemi ile üretmiş ve mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Sonuç olarak çok duvarlı karbon nanotüp katkısının elastisite modülünü %20 oranında, eğilme modülünü %40 oranında, darbe dayanımını %45 oranında arttırdığı gözlemlenmiştir.

Nayak ve ark. (2014), çeşitli modifiye edicilerin (Al_2O_3, SiO_2, TiO_2) örgü E-cam takviyeli epoksi kompozitlerin mekanik özelliklerine etkilerini incelemişlerdir. Modifiye edicileri mikro boyutta ve kütlece %2, %4, %6 oranında kullanmış, kompozitleri el yatırma metodu ile üretmiş ve ürettikleri kompozitlerin eğilme dayanımı, eğilme modülü ve tabakalar arası kayma dayanımı gibi mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Sonuç olarak katkılar birbirleriyle kıyas edildiğinde, mekanik özelliklere en çok etki eden katkının genel olarak silikon dioksit (SiO_2) olduğunu gözlemlemişlerdir.

Mohanty ve ark. (2014), alümina nanopartikülleri kütlece %1, %2, %3, %4 ve %5 oranında epoksiye katıp cam elyaf ve karbon elyaf takviyeli kompozitler üretmişlerdir. Sonuç olarak boyuna yöndeki çekme dayanımı ve elastisite modülü değerlerinin önemli ölçüde arttığını gözlemlemişlerdir.

Knoll ve ark. (2014), çok duvarlı karbon nanotüp ve az tabakalı grafen gibi karbon nanopartikülleri kütlece %0.3 oranında kullanıp karbon elyaf takviyeli epoksi kompozitler üretmiş ve bunların yorulma performansını incelemişlerdir. Sonuç olarak prepreg yöntemiyle üretilmiş bu kompozitlerin yarı statik mekanik özellikleri değişmezken tabakaların yorulma ömürleri önemli ölçüde artmıştır.

Hosur ve ark. (2015), karbon lif takviyeli epoksi kompozitleri, kütlece %2 montmorilonit nano kil ve kütlece %0.3 çok duvarlı karbon nanotüpler ile ayrı ayrı modifiye etmişlerdir. Ayrıca, kütlece %2 montmorilonit nano kil ve kütlece %0.1 çok duvarlı karbon nanotüpleri beraber kullanarak hibrit bir kompozit üretmişlerdir. Ürettikleri bu kompozitleri, dinamik mekanik analiz, termomekanik analiz ve 3 nokta eğme deneylerine tabi tutmuş ve sonuç olarak nanopartikül takviyesinin bu özellikleri önemli ölçüde arttırdığını ve en iyi sonucun hibrit nanopartiküllü kompozitte oluştuğunu gözlemlemişlerdir.

Xia ve ark. (2015), kenaf elyaf / polyester kompozitlerin mekanik özelliklerini ve suya dayanımını geliştirmek için, kalsiyum karbonat ($CaCO_3$) nanopartiküllerle, işlem görmüş kenaf elyaf takviyeli polyester kompozitleri vakum destekli reçine

infüzyon yöntemi ile üretmişlerdir. Sonuçlar, nanopartiküllerle işlem görmüş kompozitlerin elastisite modülü, kırılma modülü, çekme modülü ve çekme dayanımı özelliklerinin işlem görmemiş kompozitlere oranla, sırasıyla, %33.1, %64.3, %22.3 ve %67.8 arttığını ve 24 saat su içerisine batırıldığında şişme kalınlığının %19.7'den %1.9'a düştüğünü ortaya koymuştur.

Charvani ve Reddy (2015), 20-30 nm boyutlarındaki Alümina (Al_2O_3) nanopartikülleri ve aramid lifi ve aramid-karbon hibrid lifi kullanarak, lif takviyeli epoksi kompozitler üretmişlerdir. Epoksiye göre %1 oranında aldıkları nanopartikülleri metanol içine katarak önce mekanik olarak karıştırmışlar ardından dağılımı kolaylaştırmak için ultarsonik banyo kullanmışlardır. Oluşan karışımı epoksi içerisine atarak tekrar karıştırmış ve ardından metanolü buharlaştırmışlardır. Elde ettikleri epoksi ile elyafları, el yatırma yöntemi ile birleştirmiş ve 3 mm kalınlığında kompozit tabakalar elde etmişlerdir. Bu tabakalardan ASTM standartlarına göre çekme ve eğilme numuneleri çıkarmış ve bunların mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Sonuç olarak %1 oranında Alümina (Al_2O_3) nanopartikül eklemenin maksimum çekme dayanımını ve eğilme dayanımını arttırdığını, darbe dayanımında ise önemli sayılabilecek bir etki oluşturmadığını gözlemlemişlerdir.

Shah ve ark. (2015), ark deşarj plazma metodu ile üretilip yüzeyi silan (SiH_4) bağlayıcı ile modifiye edilmiş demir (Fe) nanopartikülleri kütlece %20, %30, %40 oranlarında kullanarak el yatırma yöntemi ile fiber takviyesiz epoksi ve karbon fiber takviyeli epoksi kompozitler üretmişlerdir. Ürettikleri kompozitlerin mikrodalga sönümleme ve eğilme özelliklerine bakmışlardır. Sonuç olarak en iyi mikro dalga sönümlemesinin kütlece %30 oranında ve dik yöndeki oryantasyonda gerçekleştiğini fakat eğilme özelliğinin olumsuz yönde etkilendiğini gözlemlemişlerdir.

Moon ve Kim (2015), titanyum dioksit (TiO_2) nanopartikülleri kullanarak farklı çaplara sahip karbon lif takviyeli epoksi kompozitler üretmişlerdir. Isıl işlem uygulayarak kontrol altında tuttukları titanyum dioksit (TiO_2) nanopartiküllerini 20 nm, 100 nm ve 200 nm boyutlarında kullanmış ve ürettikleri kompozitlerin mekanik

özelliklerini incelemişlerdir. Sonuç olarak kullandıkları liflerin çapından bağımsız bir şekilde en iyi sonuçların 20nm boyutunda ortaya çıktığı gözlemlenmiştir.

Wang ve ark. (2016), aramid lifleri düşük-sıcaklık hidrotermal yöntemini kullanarak nano titanya (TiO_2) ile kaplamış ve bu liflerin ara yüzey ve UV dayanımını incelemişlerdir. Deneysel testlerin sonuçlarına göre nano titanya katkısının ara yüzey dayanım değerini %40 ile %67 arasında iyileştirdiği ve UV dayanım özelliklerini arttırdığı gözlemlenmiştir.

Erkliğ ve ark. (2016), nano silika (SiO_2) partiküllerini kütlece %0.5, %1, %1.5, %2.5, %3 oranında kullanarak karbon ve kevlar karışımı lif takviyeli epoksi kompozitler üretmiş ve bunların çekme ve eğilme davranışlarını incelemişlerdir. Sonuç olarak nano silika partikül oranı arttıkça çekme dayanımının arttığını, en iyi değerin %3 oranında oluştuğunu ve eğilme dayanımı için %1.5 oranına kadar artış olduğunu bu orandan sonra eğilme dayanımında bir azalma olduğunu gözlemlemişlerdir.

Manjunath ve ark. (2016) kütlece %3 nano alümina (Al_2O_3), %7 nano silika (SiO_2) ve %5 mikro alümina trihidrat (ATH) partiküllerini kullanarak pultrüzyon yöntemi ile tek yönlü cam elyaf takviyeli epoksi kompozitler üretmişlerdir. Ürettikleri bu kompozitlerin çekme, eğme ve darbe dayanımlarını incelemiş ve sonuç olarak bu kompozitin mekanik özelliklerinde sırasıyla %9, %20, %28 oranında bir iyileşme olduğunu gözlemlemişlerdir.

Salih ve ark. (2016), modifiye edilmiş epoksi reçinesine önce kütlece %0.5, %1.5, %3 oranlarında nano silika ve nano titanya (SiO_2, TiO_2) partikülleri katmış daha sonra nanopartikül katılmış epoksi reçineleri ile cam ve kevlar lif takviyeli polimer kompozitleri el yatırma yöntemi ile üreterek bunların mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Sonuç olarak nanopartikül katkılı epoksi reçinelerinin topaklanmadan dolayı mekanik özelliklerinin düştüğünü fakat cam ve kevlar elyaf ekleyerek ürettikleri kompozitlerin mekanik özelliklerinin epoksi reçinesine göre arttığını gözlemlemişlerdir.

Liang ve ark. (2017), alümina (Al_2O_3) nanopartikülleri katı-sıvı ayrıştırma metodu ile tek yönlü cam lifin yüzeyine modifiye ederek vinil ester kompozitleri vakum destekli reçine infüzyon yöntemi ile üretmiş ve bunların 25 ºC ve -60 ºC deki mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Araştırmacılar, nanopartikülleri kütlece %0, %0.5, %1 ve %2 oranında kullanarak ürettikleri tabakalı kompozitlerin çekme dayanımı ve eğilme dayanımı gibi mekanik özelliklerinde olumlu gelişmeler olduğunu ve en iyi sonuçların %1 oranında elde edildiğini gözlemlemişlerdir.

Afrouzian ve ark. (2017), nano silika (SiO_2) partiküllerinin 2D örülmüş cam lif takviyeli epoksi kompozitler üzerine etkilerini incelemişlerdir. Kütlece %0, %0.5, %1 ve %3 oranlarını kullanmış ve kompozitleri el yatırma yöntemi ile üretmişlerdir. Ürettikleri kompozitleri çekme, eğilme ve balistik darbe testlerine tabi tutmuş ve sonuç olarak enerji emiliminin ve çekme dayanımının maksimum değerini kütlece %0.5 oranında aldığını fakat eğilme dayanımının maksimum değerini kütlece %3 oranında aldığını gözlemlemişlerdir.

Bazrgari ve ark. (2018), 30 nm boyutlarındaki Alümina (Al_2O_3) nanopartikülleri hacimce %1 ve %3 oranında alarak, epoksi içerisine önce mekanik karıştırıcı ardından ultrasonik karıştırıcı kullanarak katmış ve nanokompozit üretmişlerdir. Ürettikleri kompozitlere sırası ile eğilme testi, izod çarpma testi, sertlik testi, pin-on-disc aşınma testi uygulamışlardır. Eğilme dayanımının her iki oranda da arttığını, darbe davranışında ve sertlikte hacimce %1 oranında, %3 oranına göre daha fazla artma olduğunu, aşınma oranlarında %1 oranında, %3 oranına göre daha fazla bir düşüş olduğunu gözlemlemişlerdir.

Bahsedilen literatür çalışmalarının özet hali Çizelge 2.1.'de verilmiştir.

Çizelge 2.1. Literatür çalışmalarının özet hali

Elyaf	Reçine	Nano partikül	Katkı Oranları	Üretim Yöntemi	Deney	Sonuç	Referans
Dokuma aramid elyaf	Epoksi reçinesi	Al_2O_3 10 µm 150 µm	Hacimce %2, %5, %10, %12, %15 Epoksiye katılmış	El yatırma	Yoğunluk, sertlik, darbe, çekme, aşınma	Değerler saf epoksi ile karşılaştırmış (Bütün değerlerde olumlu sonuçlar görülmüştür)	Kumfu ve ark., 2008
Dokuma cam elyaf	Epoksi reçinesi	Al_2O_3 110 nm Silan bağlayıcı ajanı ile modifiye edilmiş.	Ağırlıkça %2 Hem life hem epoksiye katılmış	Vakum destekli reçine infüzyon yöntemi	Çekme, yorulma	Çekme gerilmesinde saf kompozit geçilememiştir Yorulma özelliğinde önemli bir değişiklik olmamıştır	Akınyede ve ark., 2009
Politeiraf loroetilen /kevlar hibrid elyaf	Fenolik reçine	TiO_2 SiO_2 30-50 nm	Ağırlıkça %2, %4, %6, %8, %10 Fenolik reçineye katılmış	Basınç kalıplama	Aşınma	Her ikisini de eklemenin önemli bir etkisi olmamıştır. Ancak %5 TiO_2'de aşınma düşmüştür	Zhang ve ark., 2010
Dokuma kevlar elyaf	Epoksi reçinesi	Modifiye edilmiş organo kil 50 mm	Ağırlıkça %3 Epoksiye katılmış	El yatırma yöntemi	Yorulma	Statik dayanım azalmıştır. Çekme yönündeki dayanım %12 artmıştır	Ferreira ve ark., 2012
Dokuma cam elyaf	Epoksi reçinesi	Al_2O_3 10 µm	Ağırlıkça %0, %5, %7.5, %10 Epoksiye katılmış	El yatırma yöntemi	Çekme, sertlik, aşınma	Bütün özelliklerde önemli iyileşmeler görülmüştür	Raju ve ark., 2013
---	Epoksi reçinesi	Al_2O_3 50 nm	Ağırlıkça %1, %2, %3, %4, %5, %7	Kalıp yöntemi	Eğilme	Maksimum eğilme gerilmesi %4'te görülmüştür	Kadhim ve ark., 2013
---	Epoksi reçinesi	ZnO ZnO_2 CeO_2	Ağırlıkça %0.5, %1, %1.5, %2, %2.5, %3	Kalıp yöntemi	Yoğunluk, sertlik, çekme, eğilme, basma	Her üç partikül için de %1 değerinde olumlu olarak en iyi sonuçlar elde edilmiştir	Harishan and ve ark., 2013

Çizelge 2.1. **(devam)**

Elyaf	Reçine	Nano partikül	Katkı Oranları	Üretim Yöntemi	Deney	Sonuç	Referans
Dokuma kevlar elyaf	Epoksi reçinesi	Modifiye edilmiş organo kil 50 µm	Ağırlıkça %1.5, %3, %6 Epoksiye katılmış	El yatırma	Darbe (ağırlık düşürme)	Katkı oranı arttıkça maksimum darbe yükü artmış ve %6'da en iyi sonuç görülmüştür	Reis ve ark., 2013
Dokuma kevlar elyaf	Epoksi reçinesi	Çok duvarlı karbon nanotüp 5-10 nm	Ağırlıkça %0.3, %0.5, %1 Epoksiye katılmış	El yatırma	Çekme, eğilme, izod darbe	Elastisite modülü %20, eğilme modülü %40, darbe dayanımı %45 oranında artmıştır	Taraghi ve ark. 2014
Dokuma E-cam elyaf	Epoksi reçinesi	Al_2O_3, 1.914 µm SiO_2, 6.069 µm TiO_2, 0.346 µm	Hacimce %2, %4, %6, Epoksiye katılmış	El yatırma	Sertlik, yoğunluk, eğilme, su emme	Her üç partikül için katkı oranları arttıkça özelliklerin iyileştiği görülmüştür	Nayak ve ark., 2014
Kısa cam elyaf, karbon elyaf	Epoksi reçinesi	Al_2O_3 25–90 µm	Ağırlıkça %1, %2, %3, %4, %5 Epoksiye katılmış	El yatırma	Fourier transform, geçirmeli elektron mikroskopu, çekme	En iyi sonuçlar karbon elyafa %2 oranında Al_2O_3 katıldığında elde edilmiştir	Mohanty ve ark., 2014
Dokuma karbon elyaf	Epoksi reçinesi	Çok duvarlı karbon nanotüp 10-20 nm Nanokil	Ağırlıkça %0.1 ÇDKNT+ %2 nanokil Epoksiye katılmış	El yatırma + Basınç kalıplama	Eğilme, Darbe (ağırlık düşürme), TMA	Oluşturulan kompozitin genel olarak mekanik özelliklerinde artış görülmüştür	Hosur ve ark., 2015

Çizelge 2.1. **(devam)**

Elyaf	Reçine	Nano partikül	Katkı Oranları	Üretim Yöntemi	Deney	Sonuç	Referans
Kenaf	Polyester reçine	$CaCO_3$ nanopartikül	Kimyasal karışım sonucu elde edilen miktar	Vakum destekli reçine infüzyon	Eğilme, çekme, su emme	Elastisite modülü, kırılma modülü, çekme modülü ve çekme dayanımı özelliklerinin, sırasıyla, %33.1, %64.3, %22.3, %67.8 arttığı gözlemlenmiştir	Xia ve ark., 2015
Aramid elyaf ve aramid-karbon hibrid elyaf	Epoksi reçinesi	Al_2O_3 20-30 nm	Ağırlıkça %1 Epoksiye katılmış	El yatırma	Çekme, eğilme	Çekme ve eğilme dayanımının arttığı ve darbe dayanımında önemli bir değişiklik olmadığı gözlemlenmiştir	Charvani ve Reddy, 2015
Dokuma karbon-kevlar hibrit elyaf	Epoksi reçinesi	SiO_2 15 nm	Ağırlıkça %0.5, %1, %1.5, %2.5, %3 Epoksiye katılmış	El yatırma	Çekme, eğilme	Çekme için en iyi değer %3 katkılı numunelerde, eğilme için en iyi değer %1.5 katkılı numunelerde gözlemlemiştir	Erkliğ ve ark., 2016
Tek yönlü cam elyaf	Epoksi reçinesi	SiO_2 12 nm Al_2O_3 12 nm ATH 1.2 µm	Ağırlıkça %3 Al2O3 %7 SiO2 %5 ATH Epoksiye katılmış	Pultrüzyon	Çekme, eğilme, izod darbe	Çekme, eğilme ve darbede sırasıyla %9, %20, %28 oranında iyileşmeler gözlemlenmiştir	Manjunath ve ark., 2016
E-cam elyaf, Aramid-49 elyaf	Epoksi reçinesi	TiO_2 65.91 nm SiO_2 28.95 nm	Ağırlıkça %0.5, %1.5, %3 Epoksiye katılmış	El yatırma	Çekme, eğilme, izod darbe	Topaklanmadan dolayı mekanik özelliklerde düşüş gözlemlenmiştir	Salih ve ark., 2016

Çizelge 2.1. **(devam)**

Elyaf	Reçine	Nano partikül	Katkı Oranları	Üretim Yöntemi	Deney	Sonuç	Referans
Tek yönlü cam elyaf	Vinil ester reçinesi	Al_2O_3 50 nm	Ağırlıkça %0.5, %1, %2 Lif yüzeyine katılmış	Vakum destekli reçine infüzyon	Çekme, eğilme	Çekme için en iyi artış %1'de gerçekleşirken, eğilme için %0.5'te görülmüştür	Liang ve ark., 2017
Dokuma cam elyaf	Epoksi reçinesi	SiO_2 15 nm	Ağırlıkça %0, %0.5, %1 ve %3 Epoksiye katılmış	El yatırma	Çekme, eğilme, balistik darbe	Darbe ve çekme dayanımının maksimum değerini %0.5 oranında aldığı eğilme dayanımının maksimum değerini %3 oranında aldığı görülmüştür	Afrouzian ve ark., 2017

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Materyal

Nanokompozit üretimi için nanopartikül olarak Alüminyum Oksit (Al_2O_3) nanopartiküller seçilmiştir. Teknik özellikleri Çizelge 3.1.'de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Alüminyum oksit (Al_2O_3) nanopartikülün teknik özellikleri

Al_2O_3 Nanopartikülün Teknik Özellikleri	
Saflık	%99.5+
Renk	Beyaz
Ortalama Partikül Boyutu	78 nm
Spesifik Yüzey Alanı	20 m^2/g
Morfoloji	Neredeyse Küre Şeklinde
Kristalografik Yapı	Romboedrik

Nanopartikülleri modifiye etmenin epoksi lif ara yüzeyindeki uyumluluğu arttırdığı ve böylece nanokompozitin mekanik özelliklerini iyileştirdiği bilinmektedir (Moon ve ark., 2005). Bu çalışmada Al_2O_3 nanopartiküllerinin yüzeyini modifiye etmek için silan bağlayıcı ajanı olarak 2-(3,4-Epoxycyclohexyl)ethyltrimethoxysilane kullanılmıştır. Bu modifiye işlemi için çözücü olarak ekstra saf tetrahidrofuran kullanılmıştır. Matris malzemesi olarak Çizelge 3.2.'de teknik özellikleri gösterilen MGS L 285 laminasyon reçinesi ile H287 sertleştiricisi kullanılmıştır.

Çizelge 3.2. Reçine ve sertleştiricinin teknik özellikleri

MGS L 285 Laminasyon Reçinesi		**H287 sertleştiricisi**	
Yoğunluk	1.18-1.23 g/cm^3	Yoğunluk	0.93-0.96 gr/ cm^3
Vizkosite	600-900 mPas	Vizkosite	80-120 mPas
Epoksi eşdeğeri	155-170 gr/eşdeğer	Amin Değeri	450-500 mgr KOH/gr
Epoksi değeri	0.59-0.65 eşdeğer/100gr	Refraktör indeksi	1.4950-1.4990
Refraktör indeksi	1.525-1.530		

Takviye malzemesi olarak aramid elyaflar kullanılmıştır. Teknik özellikleri Çizelge 3.3.'te verilmiştir. Aramid elyafların yüzeyini modifiye etmek için çözücü olarak izo propil alkol kullanılmıştır.

Çizelge 3.3. Aramid elyaf teknik özellikleri

Aramid Elyaf		
Dokuma Stili	4H Saten	
Lif	Kevlar 49 ya da eşdeğeri / 2400 dtex	
Alan Ağırlığı	326 ± 4% g/m^2	
Kalınlık	400 ± 15% µm	
İplik	Argaç	Çözgü
	6.7 ± 0.3 cm	6.7 ± 0.3 cm
Çekme Dayanımı	Argaç	Çözgü
	> 2000 N/cm	> 2000 N/cm

3.2. Yöntem

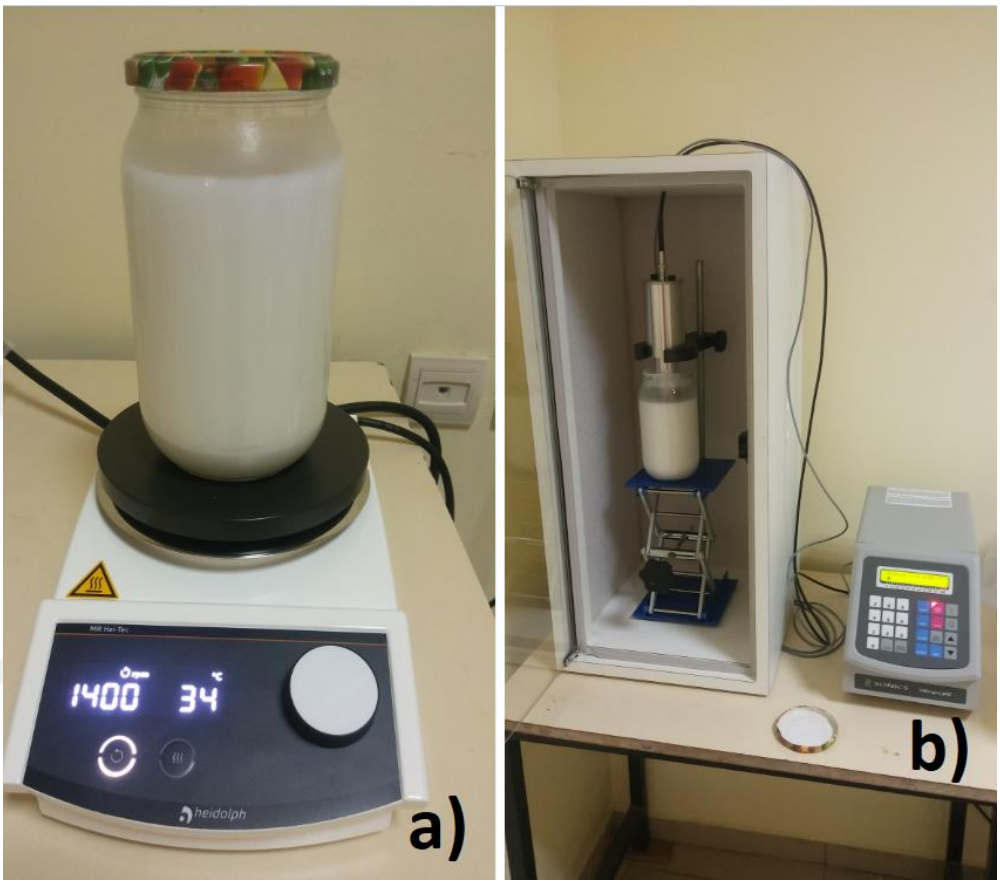
3.2.1. Nanopartiküllerin yüzey modifikasyonu

Satın alınan alüminyum oksit nanopartiküller öncelikle içerisindeki nemden arındırmak amacı ile 110 ºC'de 24 saat boyunca fırında bekletilmiştir (Naeem ve ark., 2013). Nanopartiküllerin yüzeyini modifiye etmek için Şekil 3.1.'de gösterilen nemden arındırılan nanopartiküllerden 100 gram, silan bağlayıcı ajanından 50 gram ve tetrahidrofurandan 625 mililitre (Guo ve ark., 2006) alınarak kolloidal bir karışım oluşturulmuştur.



Şekil 3.1.a. Silan bağlayıcı ajanı b. Nanopartikül c. Tetrahidrofuran

Bu karışım 5 dakika boyunca 1400 dev/dk hızda manyetik karıştırıcıda karıştırıldıktan sonra sıcaklığın 60 ºC'yi aşmayacağı bir ortamda %40 genlik değerinde 20 dakika boyunca ultrasonik karıştırıcıda karıştırılmıştır (Hosur ve ark., 2015; Essam ve ark., 2017). Manyetik karıştırıcı ve ultrasonik karıştırıcı Şekil 3.2.'de gösterilmiştir.



Şekil 3.2.a. Manyetik karıştırıcı b. Ultrasonik karıştırıcı

Daha sonra bu karışım 1 gün boyunca buzdolabında bekletilerek nanopartiküllerin kabın dibine çökmesi sağlanmıştır. Partiküllerin yüzeyinde kalan fazla silan bağlayıcı ajanından kurtulmak için, çöken partiküllerin üzerinde kalan çözücü karışımdan uzaklaştırılmış ve kalan partiküller tekrar tetrahidrofuran ile karıştırılarak yıkanmıştır. Bu işlem 3 kere tekrar edilmiş ve partiküller oda koşullarında 1 gün bekletilerek çözücünün tamamen uçması sağlanmıştır. Bekletilme işleminden sonra kalan partiküller Şekil 3.3.'de görüldüğü gibi tabaka şeklinde kaldığı için son işlem olarak bu tabaka şeklindeki partiküller Şekil 3.4.'de görülen bilyalı değirmende 300 dev/dk hızda 5 dakika boyunca öğütülmüştür.



Şekil 3.3. Modifiye işleminden sonra nanopartiküllerin tabaka formundaki hali



Şekil 3.4. Nanopartiküllerin bilyalı değirmende öğütülmesi

Öğütülen nanopartiküller, içerisindeki nemden arındırmak için 110 ºC'de 24 saat boyunca fırında bekletilmiştir. Bu işlemler 4 defa yapılarak nanokompozit üretimi için toplam 400 gram modifiye edilmiş nanopartikül Şekil 3.5.'deki gibi elde edilmiştir.

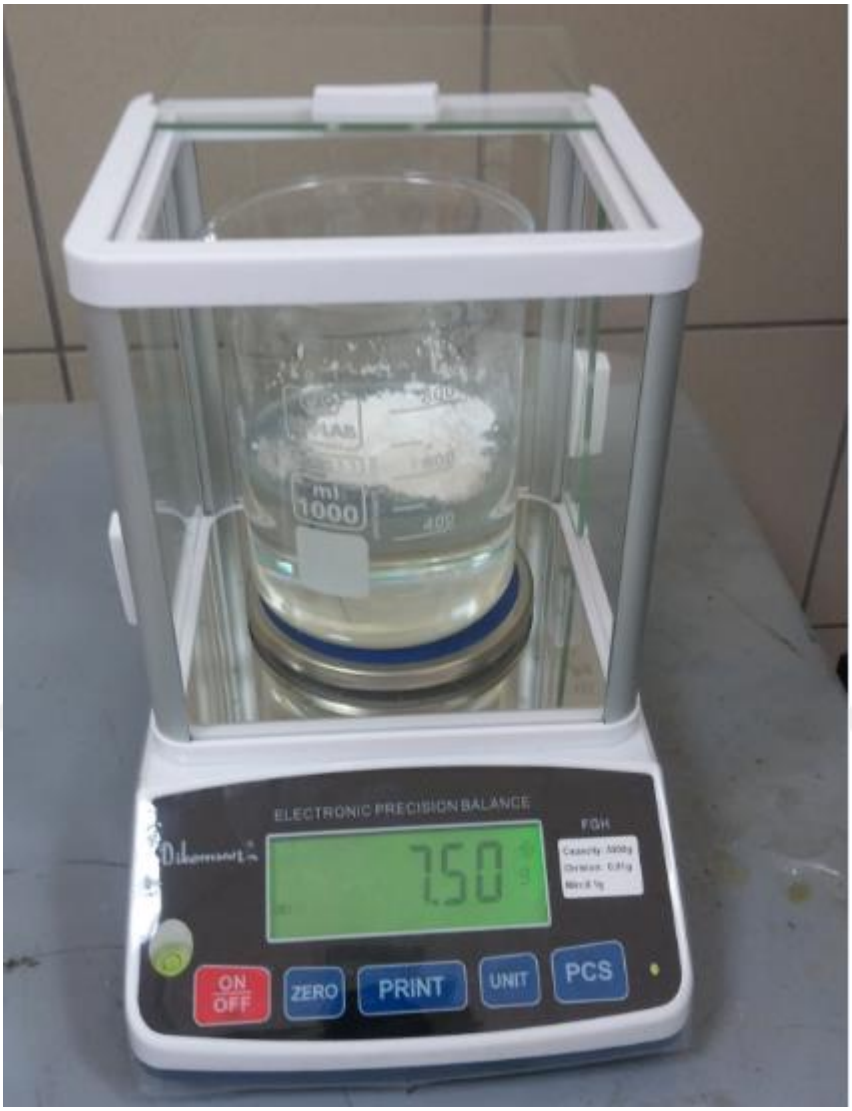


Şekil 3.5. Bilyalı değirmenden geçirilmiş toz halindeki modifiye edilmiş nanopartiküller

3.2.2. Modifiye edilmiş nanopartikülleri epoksi ile birleştirme yöntemi

İkinci aşamada modifiye edilmiş nanopartiküller epoksi ile karıştırılarak homojen bir epoksi reçinesi elde edilmeye çalışılmıştır. Öncelikle yeterli sayıda numune çıkarmak için kompozit plakanın ebatları (500 x 355 mm) belirlenmiştir. Belirlenen ebatlarda kompozit plaka üretmek için 8 kat aramid elyafın ağırlığı ölçülerek ne kadar epoksi reçinesi emdiği tespit edilmiştir. Bu oranın 8 kat aramid elyaf için 750 gram epoksi reçinesi (535 gram epoksi + 215 gram sertleştirici) olduğu

deneysel olarak bulunmuştur. Sertleştiricisi daha sonra eklenmek üzere 535 gram epoksiye modifiye edilmiş nanopartiküller Şekil 3.6.'da gösterildiği gibi kütlece sırası ile %1, %2, %3, %4, %5 oranında karıştırılmıştır (Kadhim ve ark., 2013).



Şekil 3.6. Modifiye edilmiş nanopartiküllerin ölçülerek epoksi reçinesine eklenmesi

Bu karışım 60ºC'de karıştırılmak üzere Şekil 3.7.'de gösterilen manyetik karıştırıcıya alınmıştır. Epoksinin sıcaklığının 60 ºC'yi bulması zaman aldığından önce 1 saat boyunca 500 dev/dk hızda karıştırılmış ve sonra bu hız 1000 dev/dk'ya çıkarılarak 1 saat daha karıştırılmıştır.



Şekil 3.7. Modifiye edilmiş nanopartikül katkılı epoksinin manyetik karıştırıcıda karıştırılması

Manyetik karıştırıcıdan çıkarılan karışım hiç bekletilmeden ultrasonik karıştırıcıya alınmıştır. Burada karışım, ultrasonik dalgaların sıklığından kaynaklı ısı artışından etkilenmemesi için Şekil 3.8.'deki gibi buz banyosuna koyulmuştur. Karışımın sıcaklığı 60 ºC'yi aşmayacak şekilde buz banyosu miktarı ayarlanmıştır. Bu

karışım ultrasonik karıştırıcıda %100 genlik değerinde, 15 saniye açık 30 saniye kapalı olacak şekilde 1 saat boyunca karıştırılmıştır (Khasaba, 2014).



Şekil 3.8. Epoksinin koyulduğu buz banyosu

Ultrasonik karıştırıcıdan çıkarılan karışımın içine sertleştirici eklenerek el ile 5 dakika boyunca karıştırılmıştır. Karışım, içerisindeki hava kabarcıklarından kurtulmak için vakum gaz alma odasına koyulmuştur. Bu odada yaklaşık 6 dakika boyunca her 2 dakikada bir kapatıp açılacak şekilde bekletilmiştir. Şekil 3.9.'da gösterildiği gibi hava

kabarcıklarından arındırılan karışım vakum destekli reçine infüzyon yöntemi için hazırlanan tezgâha aktarılarak kompozit plaka üretim aşamasına geçilmiştir.

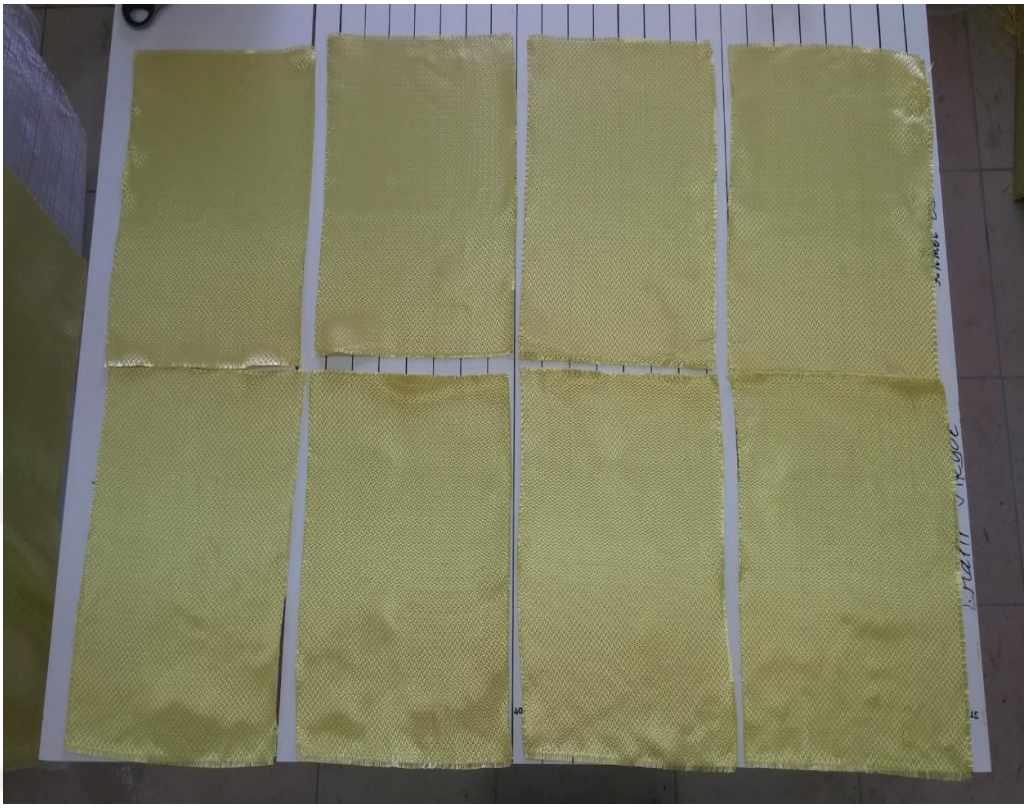


Şekil 3.9. Vakum gaz alma odasında epoksinin içerisindeki kabarcıkların giderilmesi

3.2.3. Vakum destekli reçine infüzon yöntemi kullanılarak kompozit plaka üretimi

Modifiye edilmiş nanopartikül katkılı epoksi reçinesi homojen bir şekilde hazırlandıktan sonra vakum destekli reçine infüzyon (VARTM) tezgahına aktarılarak nanokompozit plaka üretilmiştir. Aşağıda VARTM tezgahının hazırlanışı sırası ile anlatılmıştır.

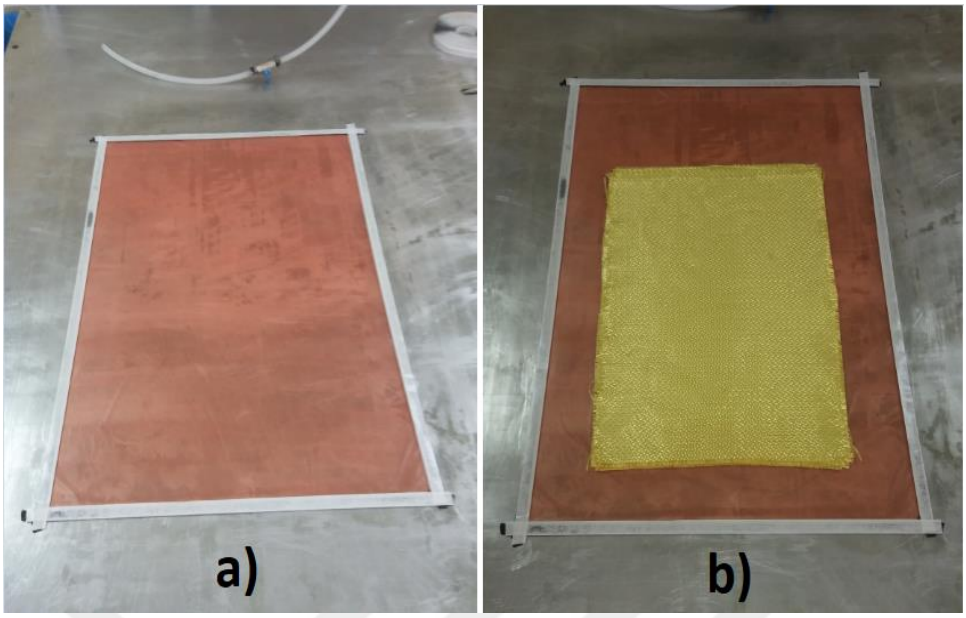
Takviye malzemesi olarak kullanılacak aramid elyaflar daha önceden belirlenmiş ebatlarda Şekil 3.10.'da görüldüğü gibi kesilmiştir.



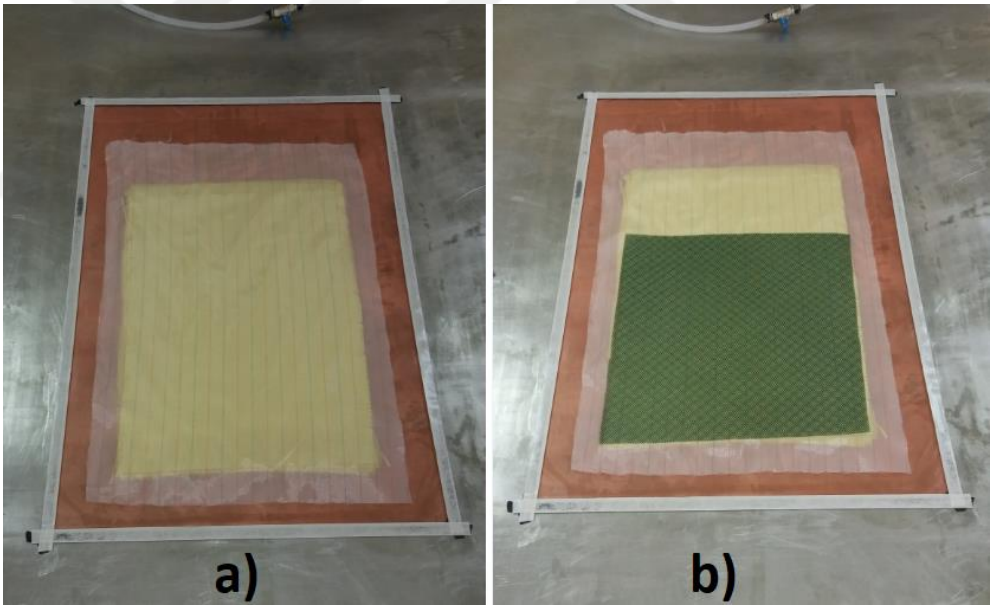
Şekil 3.10. Belirlenen ebatlarda kesilen 8 kat aramid kumaşlar

En alta epoksinin zemine yapışmasını engellemek için kalıp ayırıcı film serilerek kenarları Şekil 3.11.a.'daki gibi sızdırmazlık bandı ile kapatılmıştır. Kalıp ayırıcı film üzerine, hazırlanan 8 kat aramid elyaf Şekil 3.11.b.'deki gibi serilmiştir.

Plakanın infüzyon filesine yapışmasını engellemek için aramid kumaşların üzerine beyaz soyma kumaşı Şekil 3.12.a.'daki gibi yerleştirilmiştir. Ardından reçinenin elyaflara infüzyonunu kolaylaştırmak için yeşil infüzyon filesi Şekil 3.12.b.'deki gibi serilmiştir.



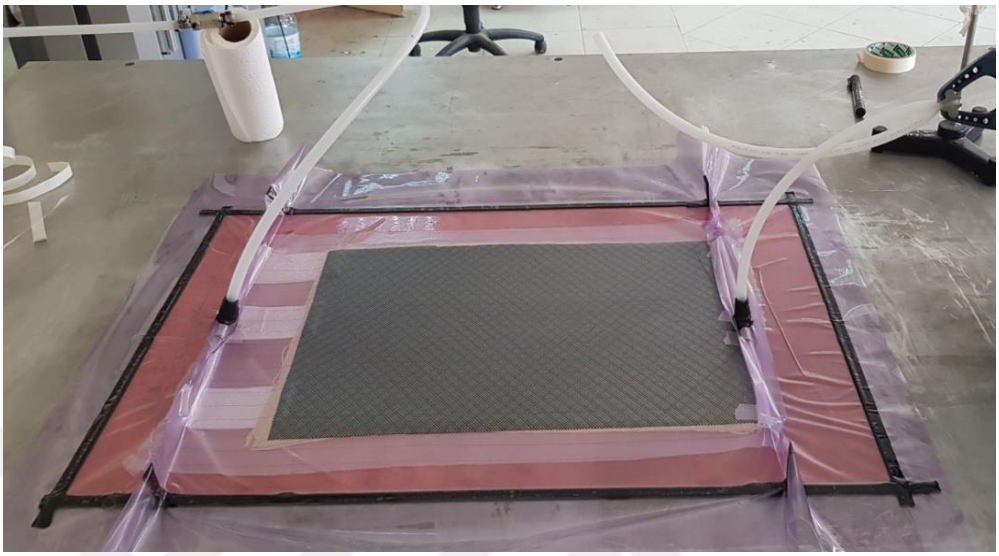
Şekil 3.11.a. Kalıp ayırıcı filmin yerleştirilmesi b. Aramid elyafların yerleştirilmesi



Şekil 3.12.a. Beyaz soyma kumaşının yerleştirilmesi b. Yeşil infüzyon filesinin yerleştirilmesi

Son olarak gerekli bağlantı aparatları yerleştirilerek sistem vakum poşeti ile kapatılmıştır. Reçine infüzyonu için hazır olan Şekil 3.13.'de gösterilen tezgâha bir önceki bölümde hazırlanan modifiye edilmiş nanopartikül katkılı epoksi reçinesi infüze edilmiştir. Reçine infüzyonundan sonra tezgâh, epoksi reçinesinin alındığı firmanın belirtmiş olduğu optimum değerler olan 80 ºC'de 15 saat boyunca

kürlenmeye bırakılmıştır. Bu işlemden sonra tezgâhtan sökülen plaka deney yapılmak üzere ASTM standartlarına göre kesilmiştir. Kesme işleminde numunelerin yanmasını engellemek için su soğutmalı tezgâh tipi testere kullanılmıştır.



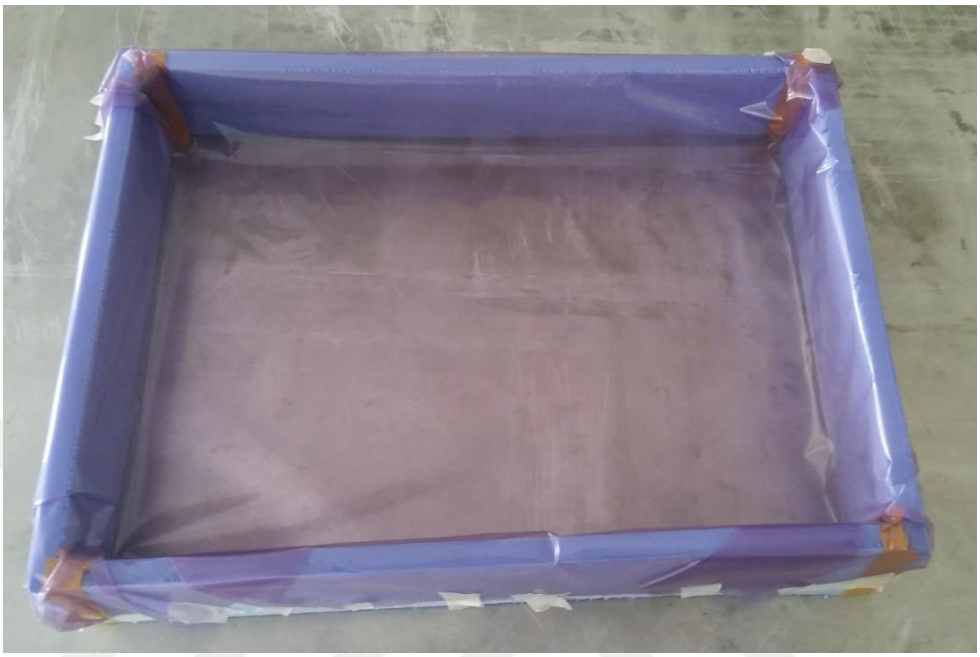
Şekil 3.13. Epoksi infüze edilmeye hazır VARTM tezgâhı

3.2.4. Modifiye edilmiş nanopartikülleri aramid elyaf ile birleştirme yöntemi

İlk bölümde modifiye edilmiş nanopartikül katkılı epoksi reçinesi ile katkısız aramid elyaf kullanılarak nanokompozitler üretilmiştir. Bu bölümde ise modifiye edilmiş nanopartikülleri aramid elyafın yüzeyine ekleyip, yüzeyi modifiye edilmiş bu elyaflar ile katkısız epoksi reçinesi kullanılarak nanokompozitler üretilmiştir. Elyafların yüzeyine nanopartikül ekleme işlemi aşağıda sırası ile anlatılmıştır.

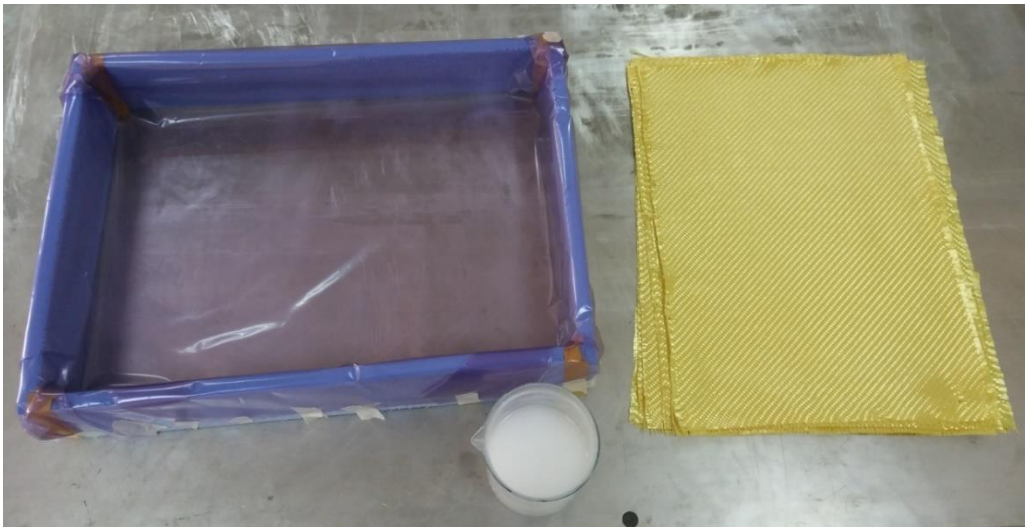
Öncelikle 8 kat aramid elyafın ne kadar izopropil alkol emdiği deneysel olarak tespit edilmiş ve bu miktarın 650 grama tekabül ettiği gözlemlenmiştir. 650 gram çözücünün içerisine sırası ile %1, %2, %3, %4, %5 oranında nanopartikül eklenmiştir. Bu çalışma için yüzde oranları epoksi reçinesine (750 gram) göre baz alınmıştır. Yani sırası ile çözücüye 7.5 gr, 15 gr, 22.5 gr, 30 gr ve 37.5 gr nanopartikül eklenmiştir. Oluşturulan karışım 60 ºC'de 2 saat boyunca 1000 dev/dk hızda manyetik karıştırıcıda karıştırılmıştır. Buradaki işlemden sonra ultrasonik karıştırıcıya alınan karışım %100 genlik değerinde, 15 saniye açık 30 saniye kapalı olacak şekilde 1 saat boyunca

karıştırılmıştır. Bir önceki bölümde olduğu gibi burada da sıcaklığın aşırı artmaması için karışım buz banyosuna alınmıştır. Karışım homojen bir şekilde oluşturulduktan sonra Şekil 3.14.' de görülen kabın içerisine dökülmüştür (Liang ve ark., 2017).



Şekil 3.14. Modifiye edilmiş nanopartikül katkılı çözeltinin döküldüğü kap

Daha sonra 8 kat aramid elyaf bu kabın içerisine daldırılarak elyafların çözücüyü emmesi sağlanmıştır. Bu işlem için kullanılan malzemeler Şekil 3.15.'de gösterilmiştir. Emme işleminden emin olmak için elyaflar 10 dakika boyunca karışımın içerisinde bekletilmiştir. Daha sonra kabın içerisinden çıkarılan elyaflar, çözücünün uçması ve nanopartiküllerin elyafların yüzeyinde kalmasını sağlamak için fırına alınarak 2 saat boyunca 120 ºC'de bekletilmiştir. Yüzeyi modifiye edilen elyaflar katkısız epoksi reçinesi ile birleştirilmek üzere bir önceki konuda anlatılan önceden hazırlanmış VARTM tezgahına alınmış ve nanokompozit plaka üretilmiştir.



Şekil 3.15. Aramid elyafları modifiye etmek için kurulan sistem

3.2.5. Yöntemlerin birleştirilmesi

İki farklı yöntem ile üretilen nanokompozitlerin mekanik özellikleri (çekme deneyi, basma deneyi, üç nokta eğme deneyi ve charpy darbe deneyi) ayrı ayrı incelenmiş ve her iki yöntem için bu özelliklerin en iyi olduğu oranlar belirlenmiştir.

Deney sonuçları incelendiğinde her iki yöntem için de en iyi artış gösteren mekanik özelliğin eğilme mukavemeti olduğu gözlemlenmiştir. Çalışmanın bu kısmında bu özelliğin en yüksek olduğu epoksi için %1 oranı ve elyaf için %4 oranı baz alınarak iki yöntemde birleştirilmiş ve nanokompozitin mekanik özelliklerinde daha yüksek veriler elde etmek hedeflenmiştir. Birleştirme için önceki bölümlerde anlatılan adımlar tekrar edilerek, modifiye edilmiş nanopartikülden yüzde 1% oranında alınarak oluşturulan epoksi ile, modifiye edilmiş nanopartikülden yüzde 4% oranında alınarak oluşturulan elyaf birleştirilerek yeni bir nanokompozit üretilmiş ve bu iki yöntemi birleştirmenin faydalı olup olmadığı incelenmiştir. Modifiye etme işleminin başarılı olup olmadığının anlaşılması için de aynı birleştirme yöntemi ile modifiye edilmemiş nanopartiküller kullanılarak başka bir nanokompozit üretilmiş ve mekanik özellikler karşılaştırılmıştır. Toplam üretilen 13 adet plaka Çizelge 3.4.'de gösterilmiştir.

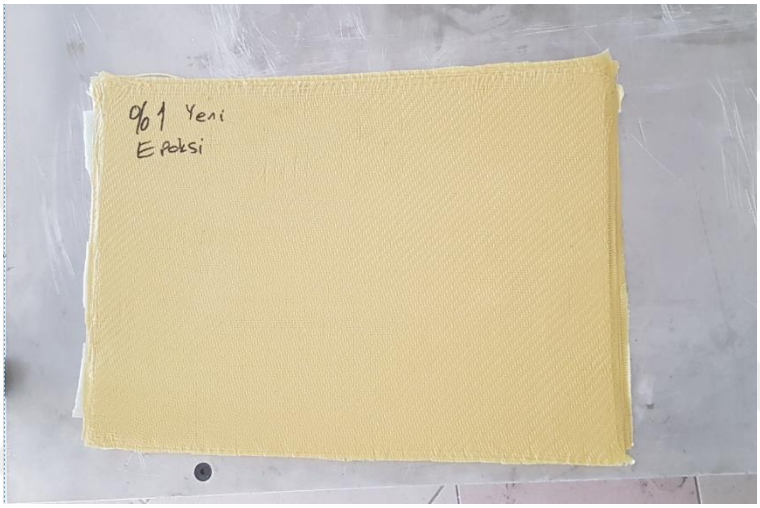
Çizelge 3.4. Üretilen 13 adet nanokompozit plaka

	Takviye Malzemesi	**Matris Malzemesi**
Nanokompozit Plaka 1	Aramid Elyaf	Epoksi Reçinesi
Nanokompozit Plaka 2	Modifiye Edilmiş Al_2O_3 Katkılı (%1) Aramid Elyaf	Epoksi Reçinesi
Nanokompozit Plaka 3	Modifiye Edilmiş Al_2O_3 Katkılı (%2) Aramid Elyaf	Epoksi Reçinesi
Nanokompozit Plaka 4	Modifiye Edilmiş Al_2O_3 Katkılı (%3) Aramid Elyaf	Epoksi Reçinesi
Nanokompozit Plaka 5	Modifiye Edilmiş Al_2O_3 Katkılı (%4) Aramid Elyaf	Epoksi Reçinesi
Nanokompozit Plaka 6	Modifiye Edilmiş Al_2O_3 Katkılı (%5) Aramid Elyaf	Epoksi Reçinesi
Nanokompozit Plaka 7	Aramid Elyaf	Modifiye Edilmiş Al_2O_3 Katkılı (%1) Epoksi Reçinesi
Nanokompozit Plaka 8	Aramid Elyaf	Modifiye Edilmiş Al_2O_3 Katkılı (%2) Epoksi Reçinesi
Nanokompozit Plaka 9	Aramid Elyaf	Modifiye Edilmiş Al_2O_3 Katkılı (%3) Epoksi Reçinesi
Nanokompozit Plaka 10	Aramid Elyaf	Modifiye Edilmiş Al_2O_3 Katkılı (%4) Epoksi Reçinesi
Nanokompozit Plaka 11	Aramid Elyaf	Modifiye Edilmiş Al_2O_3 Katkılı (%5) Epoksi Reçinesi
Nanokompozit Plaka 12	Modifiye Edilmiş Al_2O_3 Katkılı (%4) Aramid Elyaf	Modifiye Edilmiş Al_2O_3 Katkılı (%1) Epoksi Reçinesi
Nanokompozit Plaka 13	Modifiye Edilmemiş Al_2O_3 Katkılı (%4) Aramid Elyaf	Modifiye Edilmemiş Al_2O_3 Katkılı (%1) Epoksi Reçinesi

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

4.1. Deneyler

Kompozit plakalar Şekil 4.1.'deki gibi üretilmiş ve plakaların mekanik özelliklerini belirlemek için sırası ile çekme deneyi, basma deneyi, üç nokta eğme deneyi ve charpy darbe deneyleri uygulanmış ve tokluk değerleri incelenmiştir.



Şekil 4.1. Üretilen nanokompozit plaka örneği

Bu deneyleri yapabilmek için plakalar Çizelge 4.1.'de gösterilen standartlara göre kesilmiştir.

Çizelge 4.1. Yapılan deneylerin standartları

Deney Adı	Deney Standartları	Numune Boyutları (mm)	Açıklık Mesafesi (mm)	Deney Hızı (mm/dk)
Çekme Deneyi	ASTM D3039	250 x 25 x 3.2	----------	2
Basma Deneyi	ASTM D6641-16e1	140 x 13 x 3.2	----------	1.3
Üç Nokta Eğme Deneyi	ASTM D790	127 x 12.7 x 3.2	42	1
Charpy Darbe Deneyi	İSO 179-1 Normal, Yatay, Çentiksiz	80 x 10 x 3.2	62	----------

4.1.1. Çekme deneyi

Çekme deneyi numuneleri ASTM D3039 standardına göre Şekil 4.2.'deki gibi hazırlanmış ve ardından Şekil 4.3.'deki gibi deney gerçekleştirilmiştir.

Çekme deneyi en basit haliyle bir test numunesinin karşıt uçlarını bir test makinesinde karşılıklı tutturarak gerçekleştirilen bir deneydir. Makine tarafından bir çekme kuvveti uygulanır, bu da test parçasının kademeli uzamasına ve nihai olarak kırılmasına neden olur. İşlem sırasında, kuvvet uzama verileri kaydedilerek, test parçasının uygulanan gerilme kuvveti altında nasıl deforme olduğu izlenir. Çekme deneyi, bir malzemenin birkaç önemli mekanik özelliğini nicelleştirebilir. Bunlardan bazıları aşağıdaki gibi olmakla beraber bunlarla sınırlı değildir.

- Elastisite modülü (young modülü) ve poisson oranı
- Akma mukavemeti, maksimum çekme mukavemeti
- Süneklik ve tokluk özellikleri
- Gerinim sertleşmesi özelliği

Çekme testi malzemenin mekanik özelliklerini belirlemek için kullanılan önemli testlerden biridir. Bu deney çeşitli nedenlerden dolayı yapılabilir. Bunlardan bazıları aşağıda verilmiştir.

- Mühendislik uygulamaları için en iyi malzemeyi seçebilmek adına çekme deneyi yapılabilir.
- Bir malzemeyi tanımlamak için o malzemenin çekme özellikleri, malzeme spesifikasyonlarına dahil edilebilir.
- Çekme özellikleri genellikle yeni materyallerin ve süreçlerin geliştirilmesi sırasında ölçülür, böylece farklı materyaller ve süreçler karşılaştırılabilir.
- Çekme özellikleri, bir malzemenin eksenel gerilmeden farklı olarak çeşitli yüklemlere tabi tutulduğunda farklı davranışlarını öngörebilmek için kullanılabilir (Davis, 2004).



Şekil 4.2. Çekme deneyi numuneleri



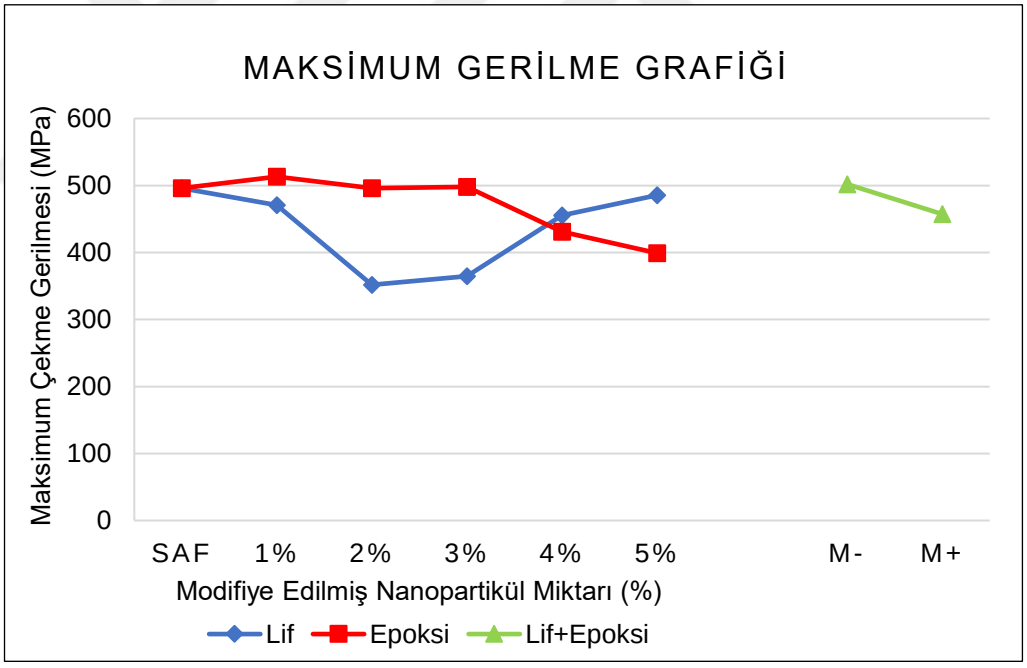
Şekil 4.3. Çekme deneyi

Çekme deneyi sonucunda numunelerin maksimum gerilme, maksimum birim şekil değiştirme, elastisite modülü ve tokluk değerleri elde edilmiştir. Şekil 4.4.'te maksimum gerilme grafiği, Şekil 4.5.'te maksimum birim şekil değiştirme grafiği, Şekil 4.6.'da elastisite modülü grafiği ve Şekil 4.7.'de malzemenin tokluk grafiği gösterilmiştir. Grafiklerin değerleri sırası ile Çizelge 4.2., Çizelge 4.3., Çizelge 4.4., ve Çizelge 4.5.'de verilmiştir.

Çizelge 4.2. Nanokompozitlerin çekme deneyindeki maksimum gerilme değerleri

	Lif (MPa)	Epoksi (MPa)
Saf	495.875	495.875
1%	470.821	513.154
2%	351.744	496.027
3%	364.631	498.091
4%	455.401	431.079
5%	485.492	399.116

	Lif+Epoksi (MPa)
M-	501.962
M+	457.343



Şekil 4.4. Nanokompozitlerin çekme deneyindeki maksimum gerilme grafiği

Grafiklerde mavi ile gösterilen çizgi modifiye edilmiş lif ile üretilen nanokompoziti, kırmızı ile gösterilen çizgi modifiye edilmiş epoksi ile üretilen nanokompoziti gösterirken, yeşil çizgi iki yöntemin birleştirilmesinden oluşturulan nanokompoziti (Lif+Epoksi) göstermektedir. Modifiye edilmemiş nanopartikülleri

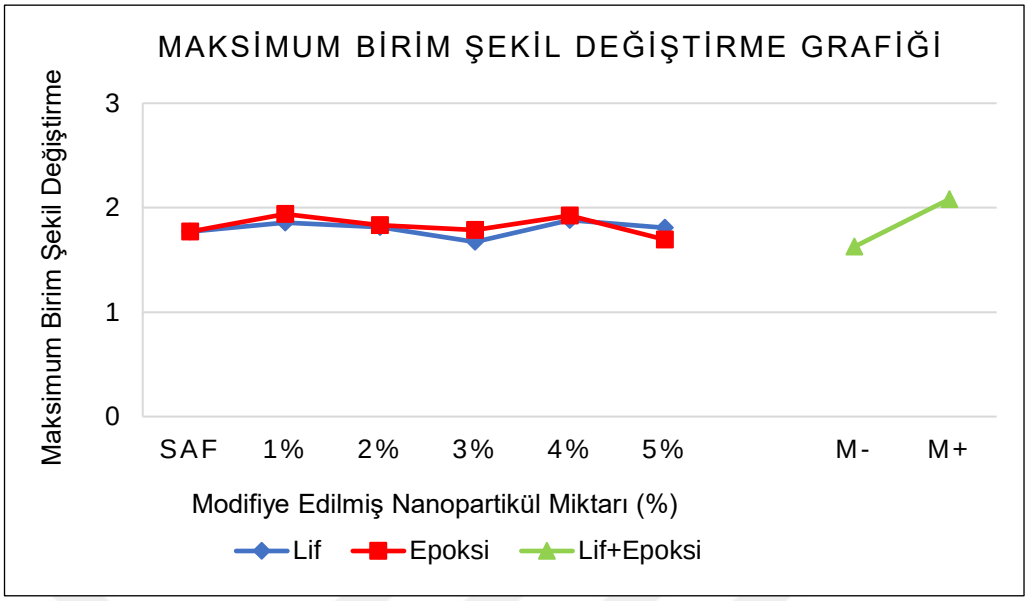
kullanarak her iki yöntemin birleştirilmesinden oluşturulan nanokompozit ‘’M-‘’ ile, modifiye edilmiş nanopartikülleri kullanarak her iki yöntemin birleştirilmesinden oluşturulan nanokompozit ‘’M+‘’ ile gösterilmiştir. Bundan sonraki bütün çizelgelerin şekillerde gösterimi bu şekildedir.

Maksimum gerilme verileri incelendiğinde en yüksek artışın %3.48 ile %1 katkılı epoksi oranında gerçekleştiği görülmektedir. Bu değer epoksi için %1’den sonra düşmeye başlamış ve %5 değerinde minimum sonuca ulaşmıştır. Life bakıldığında bu değer %3 oranına kadar düşerken, %3’ten sonra %5’e kadar artma gözlemlenmiş ancak lif için hiçbir oranda saf kompozit geçilememiştir. İki yöntemin birleştirildiği değer (M+) incelendiğinde saf kompozite göre %7.77’lik bir düşüş olduğu görülmektedir. Bu da iki yöntemi birleştirmenin maksimum gerilme değerine olumlu etki etmediği manasına gelmektedir. Aynı yöntemler modifiye edilmemiş nanopartiküller kullanılarak birleştirildiğinde (M-), bu değerin M+’ya göre %8.89’luk bir artışa sebep olduğu gözlemlenmiştir. Nanopartikülleri modifiye etmenin çekme gerilmesi için olumlu bir etki oluşturmadığı anlaşılmaktadır. Bu sonuçlar silan bağlayıcı ajanı ile modifiye edilmiş nano Al_2O_3 partiküllerini %2 oranında kullanarak cam elyaf takviyeli epoksi nanokompozitler üreten Akınyede ve ark. (2009)’nın elde ettikleri sonuçlara benzer çıkmıştır. Saf kompozitin maksimum gerilme değerinin life katılmış halinden yüksek geldiğini, epoksiye katmanın life katmaktan daha olumlu sonuçlar verdiğini gözlemlemişlerdir. Yaptıkları çalışmada sadece %2 oranını kullandıklarından ileri kıyaslama yapılamamıştır.

Çizelge 4.3. Nanokompozitlerin çekme deneyindeki birim şekil değiştirme değerleri

	Lif (%)	Epoksi (%)
Saf	1.771	1.771
1%	1.858	1.939
2%	1.813	1.832
3%	1.672	1.786
4%	1.881	1.925
5%	1.807	1.695

	Lif+Epoksi (%)
M-	1.626
M+	2.081

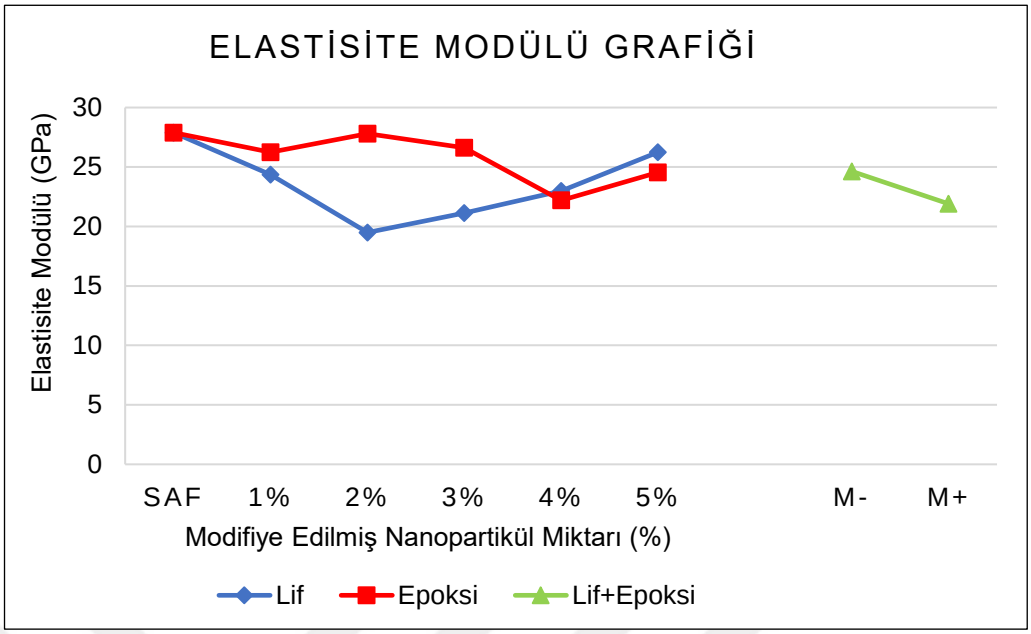


Şekil 4.5. Nanokompozitlerin çekme deneyindeki maksimum birim şekil değiştirme grafiği

Maksimum birim şekil değiştirme değerleri incelendiğinde en yüksek artışın %17.5 ile ile M+ değerinde olduğu görülmektedir. Bu da yöntemleri birleştirmenin maksimum birim şekil değiştirme üzerinde olumlu etki ettiği manasına gelmektedir. Öte yandan lif ve epoksi ayrı ayrı kıyaslandığında en yüksek artış, maksimum gerilmede olduğu gibi %1 epoksi değerindedir. Lif+epoksi kısmına bakacak olursak M+ değerinin M-'den büyük olduğu görülecektir. Bu da nanopartikülleri modifiye etmenin olumlu sonuç verdiğini göstermektedir. Öte yandan yüzdelik oranlar kendi aralarında kıyaslandığında, katkı miktarının değişmesi ile maksimum birim şekil değiştirme arasında anlamı bir bağıntı tespit edilememiştir. Akınyede ve ark. (2009)'nın elde ettiklerinin aksine %2 oranında maksimum birim şekil değiştirme için olumlu sonuçlar elde edilmiştir.

Çizelge 4.4. Nanokompozitlerin çekme deneyindeki elastisite modülü değerleri

	Lif (GPa)	Epoksi (GPa)			Lif+Epoksi (GPa)
Saf	27.891	27.891		M-	24,637
1%	24.361	26.241		M+	21.906
2%	19.494	27.804			
3%	21.135	26.609			
4%	22.991	22.192			
5%	26.256	24.552			

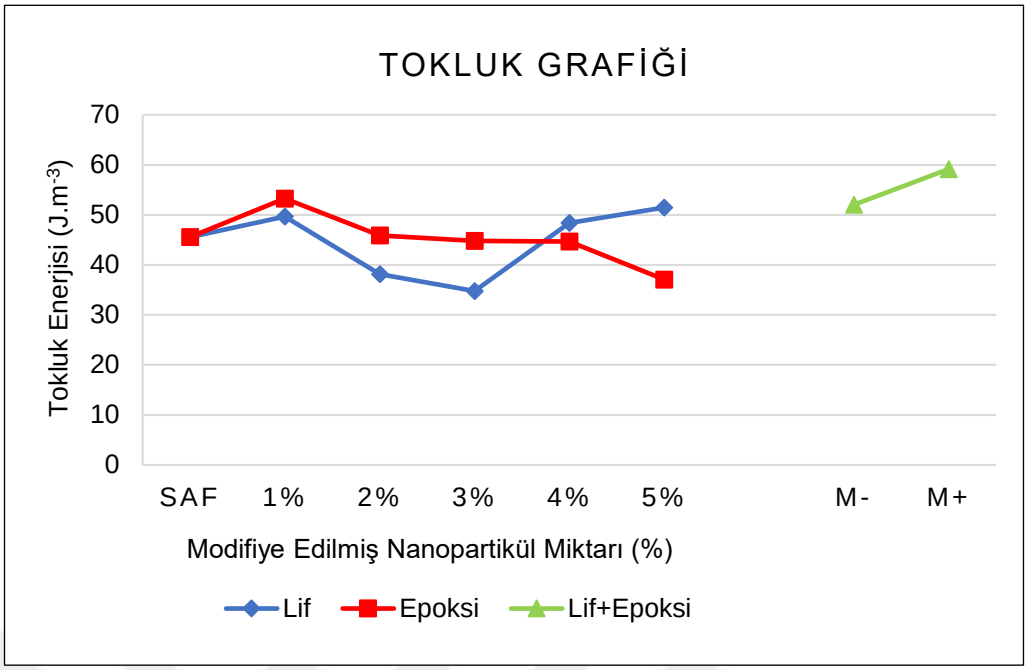


Şekil 4.6. Nanokompozitlerin çekme deneyindeki elastisite modülü grafiği

Elastisite modülü değerleri incelendiğinde hiçbir değerin saf kompoziti geçmediği gözlemlenmiştir. En yakın değer, neredeyse saf hali ile aynı değere sahip %2 katkı oranındaki epokside görülmüştür. Yöntemlerin birleştirildiği lif +epoksi değerlerine bakacak olursak bu değerlerin saf kompozitten daha düşük olduğu görülmektedir. Bu da bizi, yöntemleri birleştirmenin elastisite modülü değerleri için olumlu bir etki oluşturmadığı sonucuna götürmektedir. Lif+epoksi değerleri incelendiğinde M-'nin M+'dan daha yüksek geldiği görülmektedir. Literatüre bakıldığında cam elyafa %2 oranında katmanın elastisite modülünü arttırdığı gözlemlenirken (Akınyede ve ark., 2009), bu çalışmada aramid elyafa %2 oranında katmanın elastisite modülü değerini düşürdüğü görülmüştür.

Çizelge 4.5. Nanokompozitlerin çekme deneyindeki tokluk değerleri

	Lif ($J.m^{-3}$)	Epoksi ($J.m^{-3}$)			Lif+Epoksi ($J.m^{-3}$)
Saf	45.569	45.569		M-	52.019
1%	49.632	53.275		M+	59.164
2%	38.133	45.862			
3%	34.769	44.794			
4%	48.375	44.651			
5%	51.473	37.081			



Şekil 4.7. Nanokompozitlerin çekme deneyindeki tokluk grafiği

Tokluk bir malzemenin kırılana kadar absorbe edebildiği toplam enerji miktarı demektir. Bu çalışmada tokluk verileri gerilme-birim şekil değiştirme grafiği altındaki alanın Denklem 4.1.'deki formülle integre edilmesi ile bulunmuştur. İntegrasyon sonucu tokluğun birimi $J.m^{-3}$ olarak çıkar.

$$\int_0^{\varepsilon f} \sigma \, d\varepsilon \tag{4.1}$$

Çekme deneyi sonucunda tokluk değerleri incelendiğinde en yüksek artışın %29.83'lük değeri ile M+'da gerçekleştiği görülmektedir. Bu değer epoksi için %16.91'lik artış oranı ile en yüksek %1 katkı oranında gözlemlenirken %5 katkı oranına doğru düşmüştür. Lif için en yüksek değer %12.95 ile %5 katkı oranında gerçekleşirken, bu değer %23.7'lik bir düşüş ile %3 katkı oranında gerçekleşmiştir. Yöntemlerin birleştirildiği M+ değerinde %29.83'lük bir artış gözlemlenirken, M- değerinde %14.15'lik bir artış gözlemlenmiştir. Bu da yöntemleri birleştirmenin tokluk değerini önemli ölçüde arttırdığını ve ayrıca modifikasyon işleminin bu değeri daha yukarılara çektiğini göstermektedir.

4.1.2. Basma deneyi

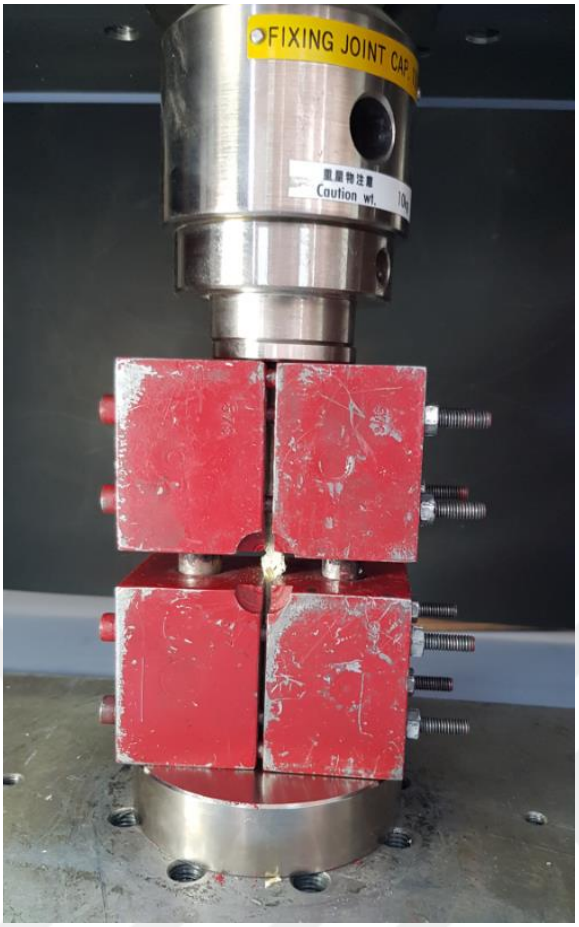
Basma deneyi numuneleri ASTM D6641-16e1 standardına göre Şekil 4.8.'deki gibi üretilmiş ve Şekil 4.9.'daki gibi basma deneyine tabi tutulmuştur.

Basma testinin amacı, bir basınç yükü altında bir malzemenin gerilme, şekil değiştirme ve deformasyon gibi temel değişkenlerini ölçerek yükün bunlara karşı davranışını belirlemektir. Basmada bir malzemenin test edilmesiyle; akma gerilmesi, maksimum gerilme ve elastisiste modülünün tümü belirlenebilir. Bu farklı parametreleri irdeleyerek malzemenin belirli uygulamalar için uygun olup olmadığı veya belirtilen basma kuvveti altında başarısız olup olmayacağı belirlenebilir.

Bir basma testi, malzemenin karşıt taraflarından içeriye doğru iten karşıt kuvvetlerin malzemeyi sıkıştırdığı herhangi bir testtir. Test numunesi genellikle, kuvveti numunenin iki karşıt yüzüne tüm yüzey alanı boyunca dağıtan iki plaka arasına yerleştirilir ve daha sonra plakalar evrensel bir test makinesi ile birlikte itilir. Sıkıştırılmış bir numune genellikle uygulanan kuvvetler yönünde kısalır ve kuvvete dik yönde genişler. Basma testi genel olarak çekme testinin tersi olarak ifade edilebilir.



Şekil 4.8. Basma deneyi numuneleri

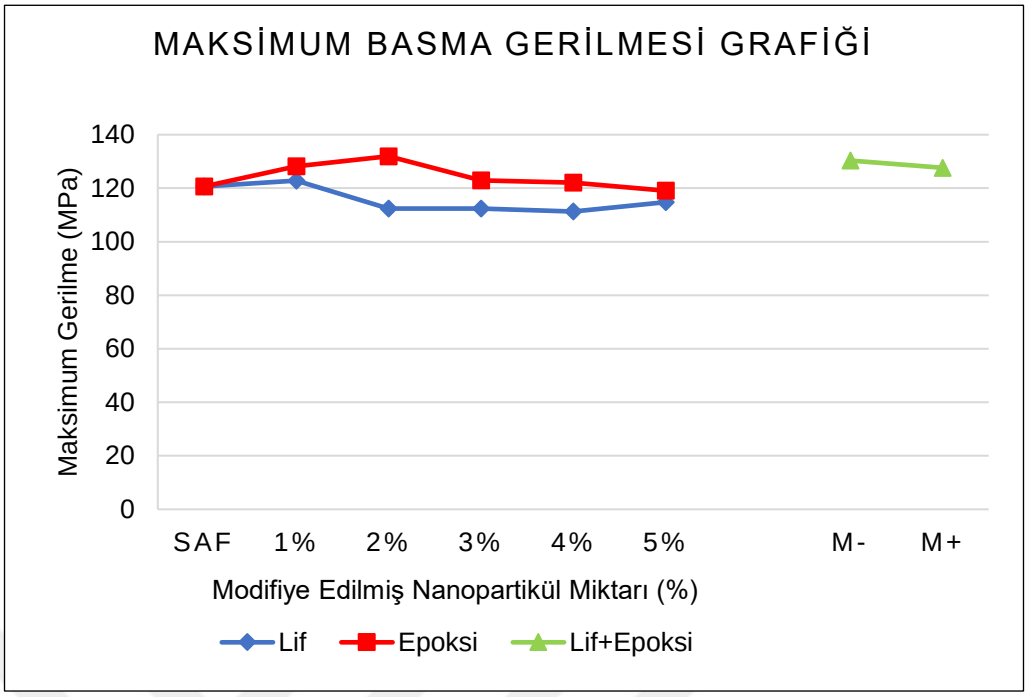


Şekil 4.9. Basma deneyi

Basma deneyi sonucunda numunelerin maksimum basma gerilmesi ve maksimum birim şekil değiştirme verileri elde edilmiştir. Şekil 4.10.'da maksimum basma gerilmesi ve Şekil 4.11.'de maksimum birim şekil değiştirme grafikleri gösterilmiştir. Bu grafiklerdeki veriler sırası ile Çizelge 4.6. ve Çizelge 4.7.'de verilmiştir.

Çizelge 4.6. Nanokompozitlerin basma deneyindeki maksimum gerilme değerleri

	Lif (MPa)	Epoksi (MPa)			Lif+Epoksi (MPa)
Saf	120.625	120.625		M-	130.345
1%	122.841	128.233		M+	127.634
2%	112.362	131.951			
3%	112.409	122.973			
4%	111.292	122.102			
5%	114.733	119.062			

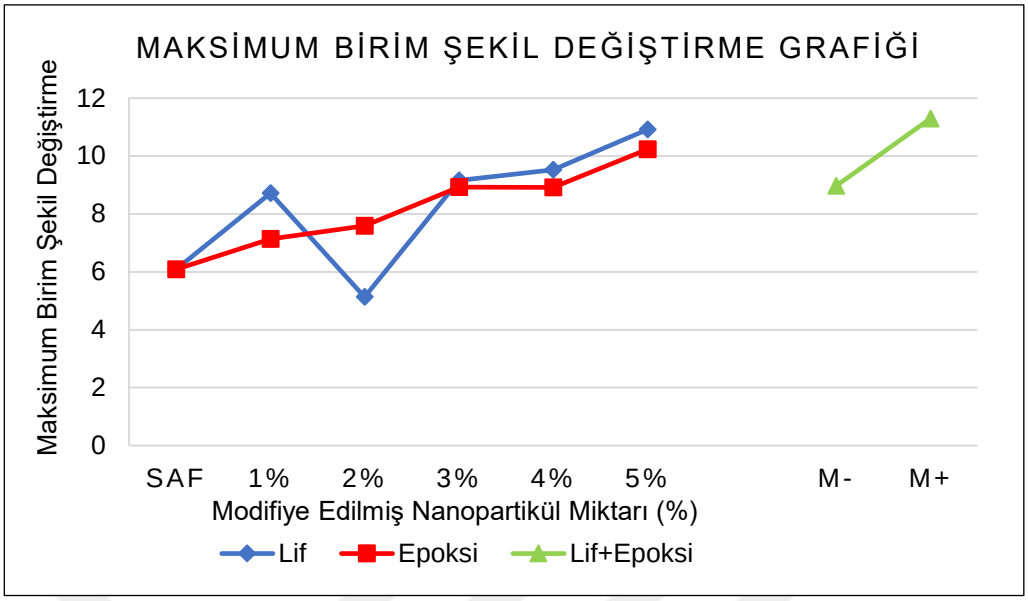


Şekil 4.10. Nanokompozitlerin basma deneyindeki maksimum gerilme grafiği

Şekil 4.10. incelendiğinde en yüksek değerin %9.38 artma oranı ile %2 epokside gerçekleştiği görülmektedir. Bu değer epoksi için %2'den sonra düşmeye başlamış ve %5 değerinde nerede ise saf hali ile aynı olmuştur. Lif değerlendirildiğinde maksimum artma oranının %1.83 ile %1 katkı oranında olduğu görülmektedir. Bu değer %1'den sonra düşmeye başlamıştır. Lif+Epoksi değerleri incelendiğinde M- değerinin M+'dan büyük geldiği görülmektedir. Bu da nanopartikülleri modifiye etmenin basma gerilmesi için olumlu bir katkı sağlamadığını göstermektedir. Bu değerler saf hali ile kıyaslandığında %8.06'ya kadar bir artış olduğu görülmektedir. Lakin M+ değeri %1'deki epoksi değerini geçemediği için yöntemleri birleştirmenin basma gerilmesi için olumlu etki ettiği söylenemez.

Çizelge 4.7. Nanokompozitlerin basma deneyindeki maksimum birim şekil değiştirme değerleri

	Lif (%)	Epoksi (%)			Lif+Epoksi (%)
Saf	6.085	6.085		M-	8.968
1%	8.721	7.136		M+	11.297
2%	5.132	7.588			
3%	9.156	8.932			
4%	9.526	8.911			
5%	10.917	10.233			



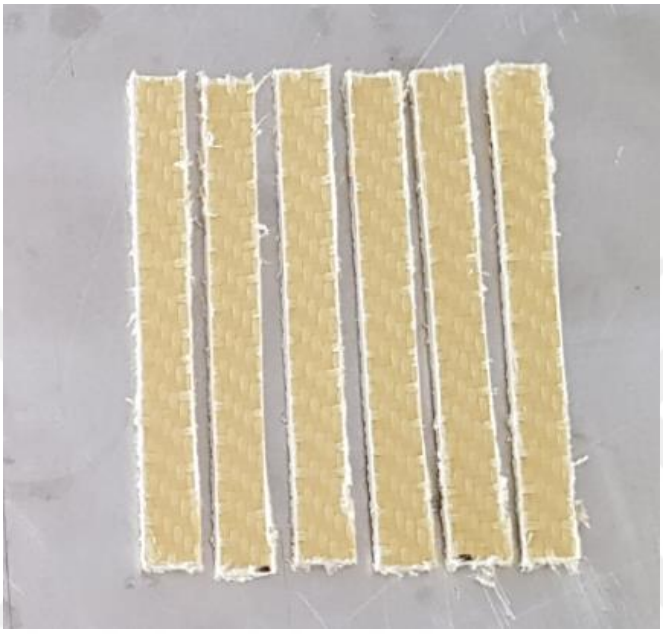
Şekil 4.11. Nanokompozitlerin basma deneyindeki maksimum birim şekil değiştirme grafiği

Maksimum birim şekil değiştirme grafiği incelendiğinde en yüksek artışın %85.65 ile M+ değerinde gerçekleştiği görülmektedir. Bu değer lif için maksimum artışını %79.41 ile %5'lik katkı oranında gerçekleştirirken, %2 katkı oranındaki lif hariç diğer değerlerde sürekli artış göstermiştir. Epoksiye bakacak olursak bütün değerler için saf haldeki kompozit geçilmiştir. Bu değer epoksi için sürekli artış göstermiş olup en yüksek değerini %68.16'lık artış oranı ile %5'lik katkı oranında almıştır. Lif+Epoksi incelendiğinde M+ değerinin M- değerinden daha yüksek geldiği görülmektedir. Bu da nanopartikülleri modifiye etmenin maksimum yüzde uzama için olumlu sonuç verdiğini göstermektedir. Ayrıca en yüksek sonucun M+ değerinde olması yöntemleri birleştirmenin olumlu sonuç verdiğini göstermektedir.

Lif takviyeli polimer kompozitler için basma deneyinde gözlemlenen; yarılma, burkulma ve yük hizalama gibi problemlerden dolayı bu deneyin uygulaması zordur ve ek bir ekipman gereklidir (Harper ve ark., 1993). Bu nedenle literatürde lif takviyeli polimer kompozitler için basma deneyi çalışmaları oldukça azdır. Yapılan bu deney için kıyaslanacak bir basma deneyi çalışmasına rastlanmamıştır.

4.1.3. Eğilme deneyi

Eğilme deneyi olarak üç nokta eğilme deneyi seçilmiş ve numuneler ASTM D790 standardına göre Şekil 4.12.'deki gibi üretilerek, Şekil 4.13.'deki gibi eğilme deneyine tabi tutulmuştur.



Şekil 4.12. Eğilme deneyi numuneleri

Eğilme testi genellikle bir malzemenin eğilme modülünü, eğilme gerilmesini ve şekil değiştirmeyi belirlemek için kullanılır. Bir eğilme testi, çekme testinden daha ekonomiktir ve test sonuçları çekme testinden farklıdır. Malzeme, iki temas noktasının üzerine yatay olarak yerleştirilir ve daha sonra numunenin çökmesi için bir veya iki temas noktası yoluyla malzemenin üzerinden bir kuvvet uygulanır. Eğilme deneyinde bir temas noktası varsa bu deneye üç nokta eğilme deneyi iki temas noktası varsa bu deneye dört nokta eğilme deneyi denir.

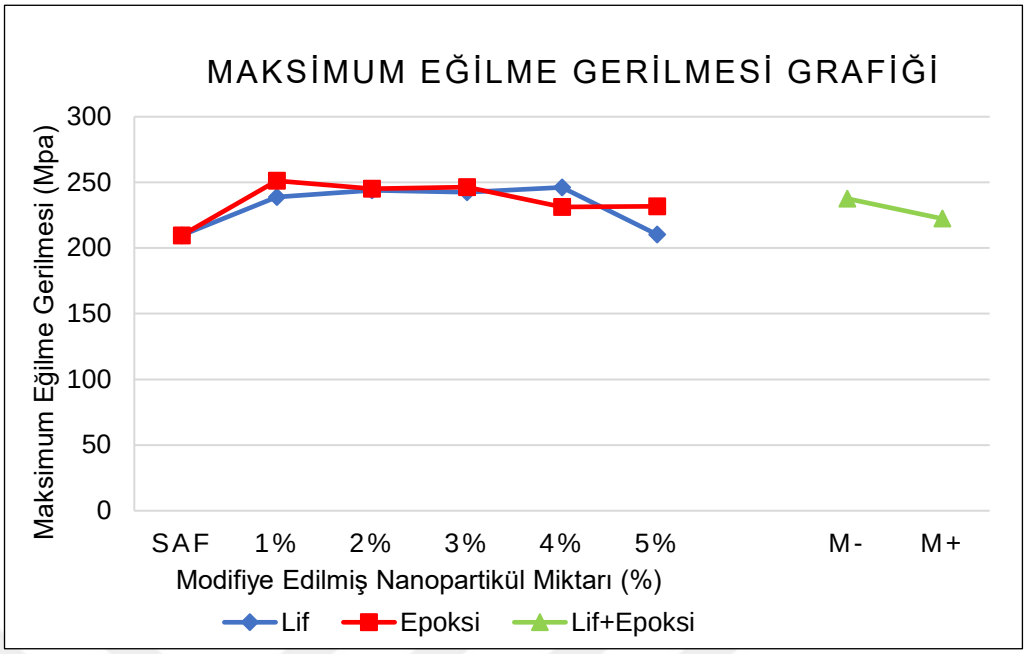
Bir basma testi veya çekme testinden farklı olarak, bir eğilme testi temel malzeme özelliklerini ölçmez. Örneğin bir malzeme eğilme yüküne maruz kalırsa malzemenin üzerinde aynı anda çekme, basma ve kesme gerilmeleri oluşur ve böylece numunenin eğilme özelliği malzemenin geometrisi ve yükün uygulanma hızından ayrı olarak birde üç gerilmenin birleşik etkisi altında incelenmiş olur.

Eğilme testinin en yaygın amacı eğilme dayanımını ve eğilme modülünü ölçmektir. Eğilme mukavemeti, numunenin basma veya çekme tarafındaki en dıştaki lifte oluşan maksimum gerilme olarak tanımlanır. Eğilme modülü, gerilme ve birim şekil değiştirme eğrisinin eğiminden hesaplanır. Bu iki değer, numune materyallerinin eğilme kuvvetlerine dayanma yeteneğini değerlendirmek için kullanılabilir.



Şekil 4.13. Üç nokta eğilme deneyi

Eğilme deneyi sonucunda maksimum eğilme gerilmesi ve maksimum sehim değerleri elde edilmiş ve incelenmiştir. Şekil 4.14.'de maksimum eğilme gerilmesi, Şekil 4.15.'de maksimum sehim grafikleri gösterilmiştir. Bu grafiklerdeki veriler sırası ile Çizelge 4.8. ve Çizelge 4.9.'da verilmiştir.



Şekil 4.14. Nanokompozitlerin eğilme deneyindeki maksimum gerilme grafiği

Çizelge 4.8. Nanokompozitlerin eğilme deneyindeki maksimum gerilme değerleri

	Lif (Mpa)	Epoksi (Mpa)
Saf	209.709	209.709
1%	238.783	251.211
2%	243.961	245.194
3%	242.446	246.409
4%	246.192	231.396
5%	210.424	231.713

	Lif+Epoksi (MPa)
M-	237.663
M+	222.395

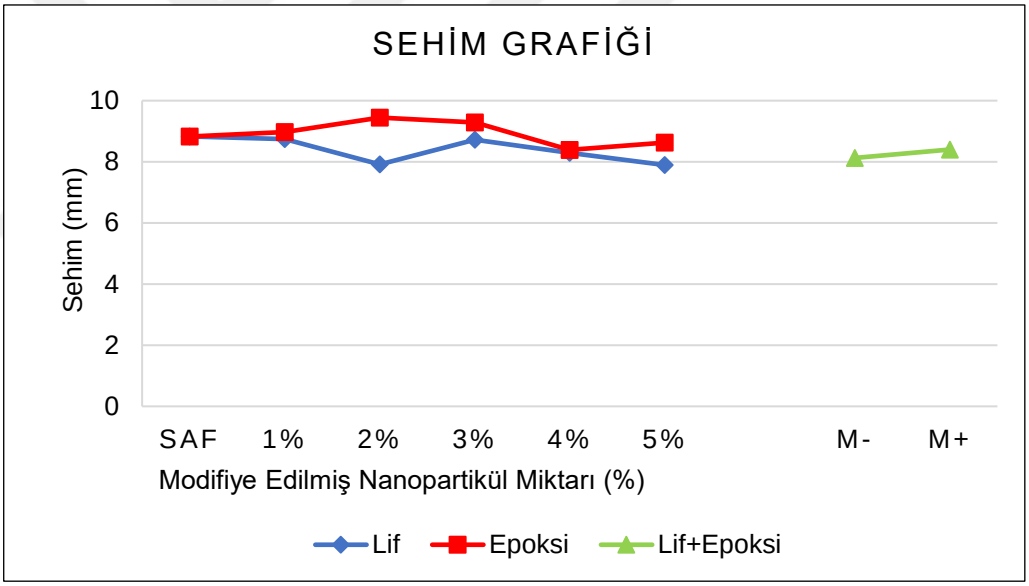
Eğilme için maksimum gerilme değerleri incelendiğinde bütün değerlerin saf kompozitin değerlerini geçtiği görülmektedir. %19.79'luk bir artış oranı ile en yüksek değer %1 katkılı epokside meydana gelmiştir. Bu değer %1'den sonra düşmeye başlamış ve %4 ve %5 değerlerinde neredeyse eşitlenerek minimum sonuca ulaşmıştır.

Charvani ve ark., (2015) epoksi reçinesine sadece %1 oranında modifiye edilmemiş nano Al_2O_3 katarak ürettikleri aramid nanokompozitler için elde ettikleri maksimum eğilme gerilmesinde bizim çalışmamızda olduğu gibi artış gözlemlemişlerdir.

Lif için değerlendirecek olursak en yüksek artış oranı %17.39'luk bir oran ile %4 katkı oranında gerçekleşmiştir. Bu değer %4'e kadar artmış sonra %5 katkı

oranında nerede ise saf hali ile eşitlenerek düşmüştür. Lif+Epoksi değerleri incelendiğinde M- değerinin M+ değerinden fazla geldiği görülmektedir. Bu da nanopartikülleri modifiye etmenin maksimum eğilme gerilmesi için olumlu bir sonuç vermediğini göstermektedir. Ayrıca bu değerler saf haldeki kompozitin değerini geçmesine rağmen %4 katkılı lifi ve %1 katkılı epoksiyi geçemediklerinden dolayı yöntemleri birleştirmenin olumlu sonuç vermediği anlaşılmaktadır.

Liang ve ark. (2017) nano Al_2O_3 partikülleri %0, %0.5, %1 ve %2 oranında cam elyaf yüzeyine ekleyerek ürettikleri vinil ester nanokompozitlerde hem eğilme gerilmesi hem de çekme gerilmesi için önemli derecede artış gözlemlemişlerdir. Yaptığımız çalışmada eğilme gerilmesi için önemli ölçüde artış gözlemlenirken çekme gerilmesi için ölçülen değerlerde kayda değer bir artış gözlemlenmemiştir.



Şekil 4.15. Nanokompozitlerin eğilme deneyindeki sehim grafiği

Çizelge 4.9. Nanokompozitlerin eğilme deneyindeki sehim değerleri

	Lif (mm)	Epoksi (mm)			Lif+Epoksi (mm)
Saf	8,829	8,829		M-	8,126
1%	8,747	8,969		M+	8,401
2%	7,915	9,446			
3%	8,72	9,285			
4%	8,288	8,39			
5%	7,894	8,627			

Şekil 4.15. incelendiğinde en yüksek değerin %6.98'lik bir artış ile %2 katkı oranındaki epokside oluştuğu görülmektedir. Bu değer epoksi için %2 katkı oranına kadar artarken %2'den sonra düşmüştür. Life bakıldığında hiçbir değerde saf haldeki kompozitin sehim değeri geçilememiştir. Buna karşın en yüksek sehim değeri %1 katkı oranındaki lifte meydana gelmiştir. Lif+Epoksi değerlerine bakacak olursak M+ değerinin M- değerinden daha yüksek geldiği görülmektedir. Bu da nanopartikülleri modifiye etme işleminin sehim için olumlu sonuç verdiğini göstermektedir. Fakat M+ değerinin %4 katkılı lif oranını geçerken, %1 katkılı epoksiyi geçememesinden dolayı yöntemlerin birleştirilmesinin sehim için olumsuz sonuç verdiği anlaşılmaktadır.

4.1.4. Charpy darbe deneyi

Charpy darbe deneyi numuneleri İSO 179-1 standardına göre Şekil 4.16.'deki gibi kesilmiştir. Vuruş yönü olarak Şekil 4.18.'de gösterilen doğrultulardan b seçeneği olan doğrultu seçilerek, Şekil 4.17.'deki gibi darbe deneyleri gerçekleştirilmiştir. Kullanılan cihazda çekiç ağırlığı 21.9 kilogram, çekiç merkez uzunluğu 0.752 metre ve çekiç enerjisi 300 joule'dür.



Şekil 4.16. Darbe deneyi numuneleri

Charpy darbe testi, kırılma sırasında bir malzeme tarafından emilen enerji miktarını belirleyen standartlaştırılmış bir testdir. Sektörde yaygın olarak uygulanmaktadır, çünkü hazırlanması ve uygulanması kolaydır ve sonuçlar hızlı ve

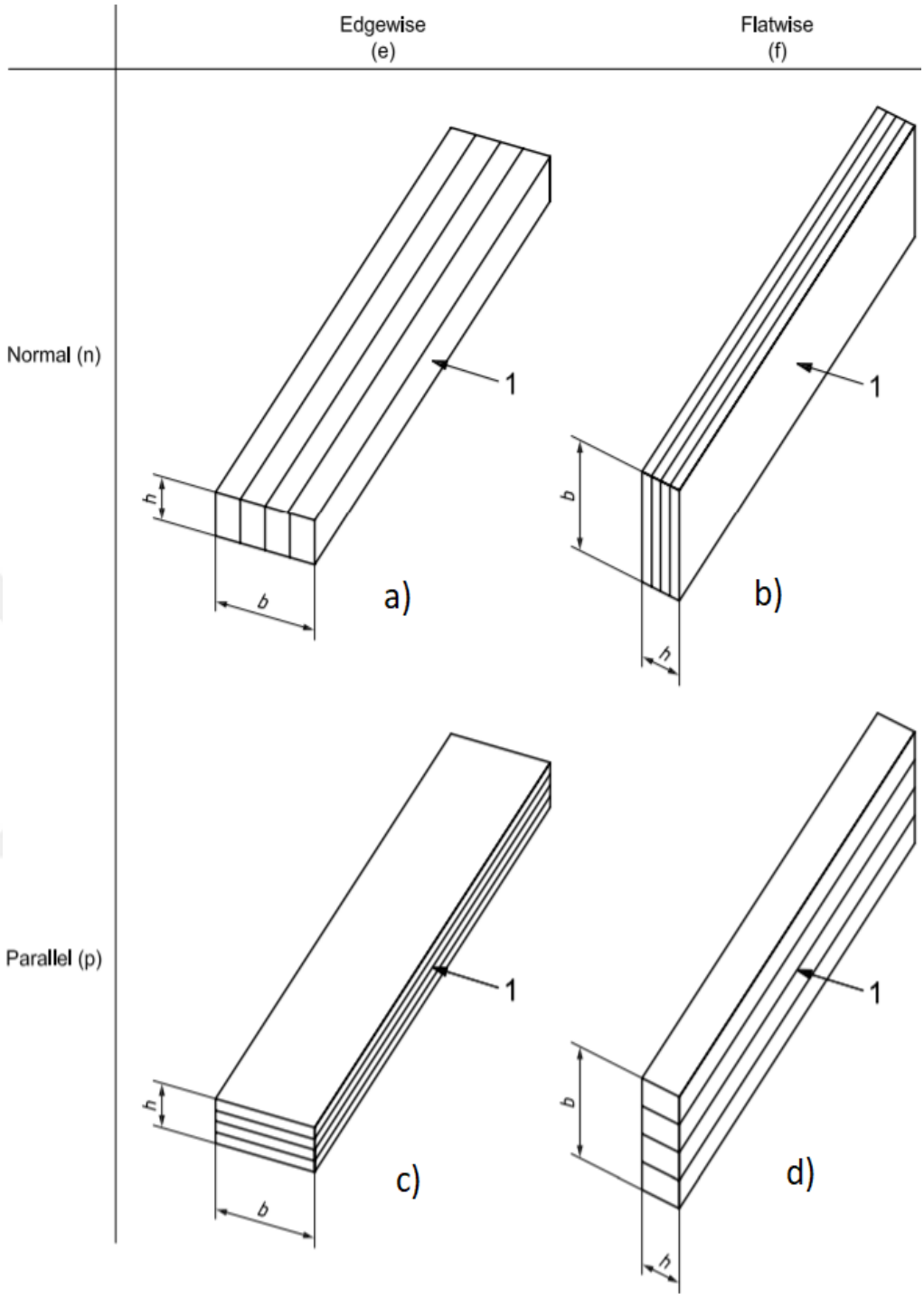
ucuz bir şekilde elde edilebilir. Dezavantajı ise bazı sonuçların sadece karşılaştırma amaçlı kullanılabilmesidir.

Charpy darbe testinde, belirli bir kütleye sahip olan çekiç denilen aparat bilinen bir yükseklikten sarkaç şeklinde düşürülerek satandartlara göre hazırlanmış numunenin kırılması sağlanır. Malzemeye aktarılan enerji, kırılmadan önce ve sonra kırıcının yüksekliğindeki (kırılma olayı tarafından emilen enerji) farkı karşılaştırılarak çıkarılır. Bulunan bu enerji malzemenin kesit alanına bölünerek darbe enerjisi hesaplanır.

Darbe testinin sayısal sonucu, bir malzemeyi kırmak için gereken enerjiyi test eder ve malzemenin tokluğunu ölçmek için kullanılabilir. Akma dayanımı ile bir bağlantı vardır, ancak bu standart bir formül ile ifade edilemez. Darbe testinin niteliksel sonucu, bir malzemenin sünekliliğini belirlemek için kullanılabilir. Eğer malzeme düz yüzey üzerinden kırılırsa, malzeme kırılgandır, eğer malzeme çentikli kenarları veya kesme dudakları ile kırılırsa, kırılma sünektir.

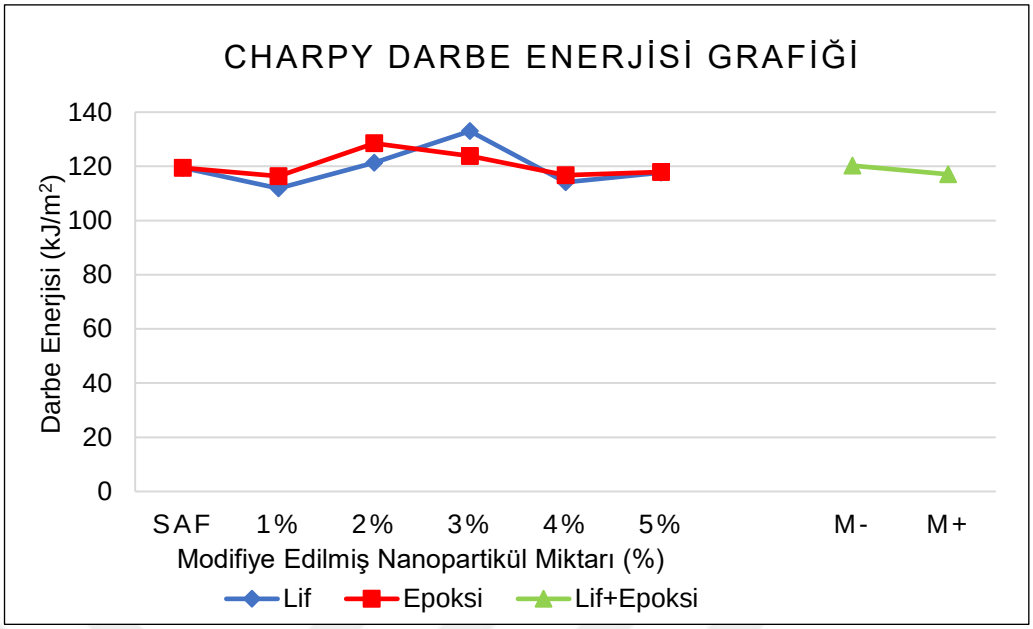


Şekil 4.17. Darbe deneyi test cihazı



Şekil 4.18. Darbe deneyi numune test doğrultuları

Darbe deneyi sonucunda numunelerin darbe enerjisine bakılmış ve sonuçlar değerlendirilmiştir. Darbe enerjisi grafiği Şekil 4.19.'de gösterilmişken verileri Çizelge 4.10.'de gösterilmiştir.



Şekil 4.19. Nanokompozitlerin darbe deneyindeki darbe enerjisi grafiği

Çizelge 4.10. Nanokompozitlerin darbe deneyindeki darbe enerjisi değerleri

	Lif (kJ/m2)	Epoksi (kJ/m2)			Lif+Epoksi (kJ/m2)
Saf	119.399	119.399		M-	120.258
1%	111.871	116.367		M+	117.078
2%	121.397	128.491			
3%	132.987	123.797			
4%	114.133	116.789			
5%	117.624	117.945			

Darbe enerjisi verileri incelendiğinde en yüksek artışın %11.33 değeri ile %3 katkılı lifte gerçekleştiği gözükmektedir. Bu veri lif için %3 değerine kadar artmış bu değerden sonra düşmeye başlamış ve %4 ve %5 değerinde nerede ise eşit çıkmıştır. Ayrıca lif için %2 ve %3 katkı oranları haricinde hiçbir oranda saf kompozit geçilememiştir. Epoksi verileri incelendiğinde en yüksek artışın %7.61 ile %2 katkı oranında gerçekleştiği gözükmektedir. Bu değer epoksi için %2 ve %3 katkı oranlarında saf kompoziti geçerken diğer değerlerde düşük kalmıştır. Lif+Epoksi verileri incelendiğinde M-'nin M+'dan daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu da nanopartikülleri modifiye etmenin darbe enerjisi açısından olumlu sonuç vermediğini göstermektedir. Ayrıca M+ değerinin Lif %4 ve Epoksi %1 değerinden %3.34'e kadar daha yüksek geldiği tespit edilmiştir. Bu da yöntemleri birleştirmenin darbe enerjisi açısından olumlu sonuç verdiğini göstermektedir.

Charvani ve ark. (2015)'nın yaptıkları çalışmada %1 katkı oranı için darbe enerjisinde önemli bir değişiklik gözlemlememişlerdir. Yapılan bu çalışmada epoksi için %1 oranında azalma gözükse de bu oran düşük kalmıştır.

5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

Bu çalışmada aramid elyaf takviyeli epoksi nanokompozitler üretilmiş ve bunların mekanik özellikleri incelenmiştir. Çalışmada yüzeyi modifiye edilmiş Al_2O_3 nanopartiküller, epoksiye göre kütlece %1, %2, %3, %4 ve %5 oranında alınmıştır. Plakalar ilk aşamada yüzeyi modifiye edilmiş nanopartikülleri sadece epoksiye karıştırarak elde edilmiş daha sonra sadece life katılarak elde edilmiştir. Katılma oranlarına göre en iyi mekanik iyileşme, gerilme cinsinden, en çok maksimum eğilme gerilmesinde elde edildiğinden dolayı, buradaki optimum oranlar alınarak (%4 Lif+ %1 Epoksi) hem epoksiye hem life modifiye edilmiş nanopartikül katılmış ve iki ayrı yöntem birleştirilmiştir. Numunelere çekme deneyi, basma deneyi, üç nokta eğme deneyi ve darbe deneyi uygulanarak sonuçlar değerlendirilmiştir.

Çizelge 4.11. Yöntemleri birleştirmede kullanılan veriler

	Çekme Gerilmesi		Basma Gerilmesi		Eğilme Gerilmesi		Darbe Enerjisi	
	Değer (MPa)	Değişim Oranı (%)	Değer (MPa)	Değişim Oranı (%)	Değer (MPa)	Değişim Oranı (%)	Değer (kJ/m2)	Değişim Oranı (%)
Saf	495.875		120.625		209.709		119.399	
Lif %1	470.821	-5.05	**122.841**	**1.84**	238.783	13.86	111.871	-6.31
Lif %2	351.744	-29.07	112.362	-6.85	243.961	16.33	121.397	1.67
Lif %3	364.631	-26.47	112.409	-6.81	242.446	15.61	**132.987**	**11.38**
Lif %4	455.401	-8.16	111.292	-7.74	**246.192**	**17.40**	114.133	-4.41
Lif %5	**485.492**	**-2.09**	114.733	-4.88	210.424	0.34	117.624	-1.49
Epoksi %1	**513.154**	**3.48**	128.233	6.31	**251.211**	**19.79**	116.367	-2.54
Epoksi %2	496.027	0.03	**131.951**	**9.39**	245.194	16.92	**128.491**	**7.61**
Epoksi %3	498.091	0.45	122.973	1.95	246.409	17.50	123.797	3.68
Epoksi %4	431.079	-13.07	122.102	1.22	231.496	10.39	116.789	-2.19
Epoksi %5	399.116	-19.51	119.062	-1.30	231.713	10.49	117.945	-1.22

Yöntemleri birleştirmede kullanılan en iyi oranlar seçilirken Çizelge 4.11.'de gösterilen değerler baz alınmıştır. Burada çekme, basma ve üç nokta eğme deneyleri için maksimum gerilmeler, charpy darbe deneyi için darbe enerjisi verileri kullanılmıştır.

Çizelge 4.11.' de görüleceği üzere en yüksek artış oranları eğilme deneyinde meydana geldiği için yöntemleri birleştirmede eğilme deneyindeki en iyi değer olan %4 Lif ve %1 Epoksi katkı oranları kullanılmıştır. Ayrıca çekme gerilmesindeki sonuçların literatürdeki cam elyaf kullanımı ile benzer çıktığı gözlemlenmiştir (Akınyede ve ark., 2009).

Modifiye edilmiş nanopartikülleri life katmanın mı daha olumlu sonuç vereceği, epoksiye katmanın mı daha olumlu sonuç vereceğini anlamak adına bütün özelliklerin maksimum sonuçlarının yansıtıldığı Çizelge 4.12. oluşturulmuştur. Bu çizelgede nanokompozitlerin bütün özellikleri için lif ve epoksi değerlerinin maksimum sonuçları alınarak yüzdelik değişim oranları hesaplanmış ve son sütunda modifiye edilmiş nanopartikülleri hangisine katmanın daha olumlu sonuç verdiği yazılmıştır.

Çizelge 4.12. Sadece lif ve epoksinin bütün özelliklerinin en iyi değerlerinin karşılaştırılması

		Saf	Lif		Epoksi		
		Değer	Değer	Değişim Oranı (%)	Değer	Değişim Oranı (%)	En iyi katılma türü
Çekme Deneyi	Maksimum Gerilme (MPa)	496	485	**-2.09**	513	**3.48**	Epoksi
	Maksimum Birim Şekil Değiştirme	1.77	1.88	**6.21**	1.9	**9.49**	Epoksi
	Elastisite Modülü (GPa)	27.9	26.3	**-5.86**	28	**-0.31**	Epoksi
	Tokluk (J/m^3)	45.6	51.5	**12.96**	53	**16.91**	Epoksi
Basma Deneyi	Maksimum Gerilme (MPa)	121	123	**1.84**	132	**9.39**	Epoksi
	Maksimum Birim Şekil Değiştirme	6.09	10.9	**79.41**	10	**68.17**	Lif
Eğilme Deneyi	Maksimum Gerilme (MPa)	210	246	**17.40**	251	**19.79**	Epoksi
	Maksimum Sehim (mm)	8,829	8,747	**-0.93**	9,446	**6.98**	Epoksi
Darbe Deneyi	Darbe Enerjisi (kJ/m^2)	119	133	**11.38**	128	**7.61**	Lif

Çizelgede 4.12.'de değişim oranlarına baktığımızda hemen hemen bütün özellikler için saf haldeki nanokompozitin değerlerinin aşıldığı görülmektedir. Bu da aramid elyaf takviyeli epoksi kompozitlere modifiye edilmiş Al_2O_3 nanopartikül katmanın hem lif için hem epoksi için mekanik özellikleri arttırdığını göstermektedir. Çekme deneyi için bariz bir farkla bütün özellikler açısından epoksiye katmanın daha anlamlı sonuç verdiği gözlemlenmiştir. Aynı sonucun cam elyafı için benzer olduğu bilinmektedir (Akınyede ve ark., 2009). Darbe deneyi için her ne kadar life katmak daha mantıklı gözükse de enerji değeri nerede ise epoksi ile aynı gözüktüğü için keskin bir ayrım söz konusu değildir. Basma ve eğilme deneyleri için çekme deneyi gibi keskin bir ayrım gözlemlenmemiştir. Öte yandan hangi özelliğin iyi olması isteniyorsa bu özellik için tabloya bakılarak hangi türe katılması gerektiğine karar verilebilir.

Hangi türe katılması gerektiği bilgisine ulaştıktan sonra, hangi oranlarda katılması gerektiği sorusu akla gelmektedir. Bunun için Çizelge 4.13. oluşturulmuş ve optimum oranlar değerlendirilmiştir.

Çizelge 4.13. Sadece lif ve epoksinin bütün özelliklerinin en iyi oranlarının karşılaştırılması

		Saf	Lif		Epoksi	
		Değer	Değer	Katkı Oranı	Değer	Katkı oranı
Çekme Deneyi	Maksimum Gerilme (MPa)	495.875	485.492	**5%**	513.154	**1%**
	Maksimum Birim Şekil Değiştirme	1.771	1.881	**4%**	1.939	**1%**
	Elastisite Modülü (GPa)	27.891	26.256	**5%**	27.804	**2%**
	Tokluk (J/m^3)	45.569	51.473	**5%**	53.275	**1%**
Basma Deneyi	Maksimum Gerilme (MPa)	120.625	122.841	**1%**	131.951	**2%**
	Maksimum Birim Şekil Değiştirme	6.085	10.917	**5%**	10.233	**5%**
Eğilme Deneyi	Maksimum Gerilme (MPa)	209.709	246.192	**4%**	251.211	**1%**
	Maksimum Sehim (mm)	8,829	8,747	**1%**	9,446	**2%**
Darbe Deneyi	Darbe Enerjisi (kJ/m^2)	119.399	132.987	**3%**	128.491	**2%**

Bu çizelgede yine bütün özelliklerin en yüksek verileri baz alınmıştır. Çizelge incelendiğinde çekme deneyi için en optimum lif oranının %4 ile %5 arasında olup %5'e daha yakın olduğunu, en optimum epoksi oranının %1 ile %2 arasında olup %1'e daha yakın olduğunu gözlemlemekteyiz. Bu oranlar diğer deneyler için çekme deneyi gibi net değildir. Basma ve eğilme deneyi için hangi özellik arttırılmak isteniyorsa

tablodan en optimum oranlar seçilerek üretim yapılabilir. Darbe deneyi için bu oran lif için %3 iken epoksi için %2 dir.

İki yöntemi birleştirmenin nasıl sonuç verdiği ile ilgili bilgiye ulaşmak için Çizelge 4.14. oluşturulmuştur. Bu çizelgede birleştirme oranları olan %4 lif ve %1 epoksi verileri alınarak birleştirme sonuçları ile karşılaştırılmış ve yüzde değişim oranları tespit edilmiştir.

Çizelge 4.14. Yöntemlerin birleştirildiği veriler

				%4 Lif + %1 Epoksi	
		%4 Lif	%1 Epoksi	M+	Değişim Oranı (%)
Çekme Deneyi	Maksimum Gerilme (MPa)	455.401	513.154	457.343	**-10.88**
	Maksimum Birim Şekil Değiştirme	1.881	1.771	2.081	**10.63**
	Elastisite Modülü (GPa)	22.991	26.241	21.594	**-17.71**
	Tokluk (J/m^3)	48.375	53.275	59.164	**11.05**
Basma Deneyi	Maksimum Gerilme (MPa)	111.292	128.233	127.634	**-0.47**
	Maksimum Birim Şekil Değiştirme	9.526	7.136	11.297	**18.59**
Eğilme Deneyi	Maksimum Gerilme (MPa)	246.192	251.211	222.395	**-11.47**
	Maksimum Sehim (mm)	8,288	8,969	8,401	**-6.33**
Darbe Deneyi	Darbe Enerjisi (kJ/m^2)	114.133	116.367	117.078	**0.61**

Çizelge incelendiğinde yöntemleri birleştirmenin çekme deneyi, basma deneyi ve eğilme deneyi için maksimum gerilme değerlerini, elastisite modülü değerini ve sehimi negatif yönde etkilediği anlaşılmaktadır. Öte yandan yöntemleri birleştirmek aynı deney grupları için maksimum birim şekil değiştirme ve çekme için tokluk özelliklerini dikkate değer bir şekilde arttırmıştır. Darbe deneyine bakacak olursak sönümlenen enerjide artış gözlemlenmiş olsa da bu artış oranı (%0.61) dikkate değer biçimde yüksek çıkmamıştır. Yöntemleri birleştirmenin en olumlu sonuç verdiği deney ve özellik ise basma deneyinde %18.59'luk bir artış ile maksimum birim şekil değiştirme özelliği olmuştur.

Bir başka karşılaştırma verisi olarak aynı oranlar (%4 lif ve %1 epoksi) bu sefer modifiye edilmemiş Al_2O_3 nanopartiküller ile birleştirilerek nanokompozit üretilmiş ve modifiye etme işleminin olumlu sonuç verip vermediği incelenmiştir. Çizelge

4.15.'de bu karşılaştırma gösterilmiştir. ''M+'' modifiye edilmiş nanopartiküller ile üretilen nanokompoziti, ''M-'' modifiye edilmemiş nanopartiküller ile üretilen nanokompoziti göstermektedir.

Çizelge 4.15. Modifiye edilmemiş nanopartiküller ile üretilen nanokompozitin karşılaştırma verisi

			%4 Lif + %1 Epoksi	
		Saf	M+	M-
Çekme Deneyi	Maksimum Gerilme (MPa)	495.875	457.343	**501.962**
	Maksimum Birim Şekil Değiştirme	1.771	**2.081**	1.626
	Elastisite Modülü (GPa)	27.891	21.906	**24.637**
	Tokluk (J/m^3)	45.569	**59.164**	52.019
Basma Deneyi	Maksimum Gerilme (MPa)	120.625	127.634	**130.345**
	Maksimum Birim Şekil Değiştirme	6.085	**11.297**	8.968
Eğilme Deneyi	Maksimum Gerilme (MPa)	209.709	222.35	**237.663**
	Maksimum Sehim (mm)	8,829	8,126	**8,401**
Darbe Deneyi	Darbe Enerjisi (kJ/m^2)	119.399	117.078	**120.258**

Çizelge incelendiğinde nanopartikülleri modifiye etmenin maksimum gerilme değerleri için olumsuz bir etki oluşturduğu gözükmektedir. Ancak modifikasyon işlemi maksimum birim şekil değiştirme, elastisite modülü ve tokluk değerleri için olumlu sonuçlara neden olmuştur. Darbe enerjisine bakacak olursak her ne kadar modifiye etmenin bu değeri düşürdüğünü gözlemlesek de veriler birbirlerine oldukça yakın çıkmıştır.

Literatüre genel olarak bakıldığında gerilme sonuçları ve darbe enerjisi için benzer sonuçlar ile karşılaşıldığı görülmektedir.

5.2. Öneriler

Yapılan çalışmanın, nanopartikülleri modifiye etmenin lif takviyeli polimer kompozitlerin mekanik özellikleri üzerine etkisi konusunda, özellikle daha önce kullanılmış ama birleştirilmemiş iki farklı yöntemin sonuçları açısından literatüre önemli katkılar sunacağı düşünülmektedir. Bu çalışmanın daha ileri gidebilmesi için tavsiye edilen öneriler aşağıdaki gibi sıralanmıştır.

- Bu çalışmada nanopartikülleri modifiye ederken bekleterek çökeltme (sedimentasyon) yöntemi kullanılmıştır. Bunun yerine santrifüj yöntemi kullanılarak nanopartiküllerin solüsyon içinde kalma süresi kısaltılarak sonuca etki edip etmediği incelenebilir.
- Modifiye edilmiş nanopartikülleri, bilyalı değirmende öğütmeden kullanarak topaklanmanın olup olmadığı gözlemlenip, topaklanma olmuyorsa bilyalı değirmen kullanmanın sonuca etki edip etmediği incelenebilir.
- Kullanılan bütün katkı oranları için modifiye edilmemiş nanopartiküller kullanılarak veri skalası genişletilebilir.
- Farklı tip nanopartiküller kullanılarak bunların modifikasyon işlemlerinin nanokompozitler üzerine mekanik özellikleri incelenebilir.
- Farklı takviye kumaşları ve farklı matris malzemeleri kullanılarak farklı nanokompozitler üretilip mekanik özellikleri incelenebilir.
- Modifiye edilmiş nanopartikülleri kullanmanın kompozitlerin balistik özellikleri üzerine etkisi incelenebilir.
- Nanopartikülleri modifiye etmenin kompozitlerin aşınma direnci ve ısı yalıtımı üzerine etkisi incelenebilir.

KAYNAKLAR

AFROUZIAN, A., ALENI, H. M., LIAGHAT, G. and AHMADI, H., 2017. Effect of nano-particles on the tensile, flexural and perforation properties of the glass/epoxy composites. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 36(12): 900–916.

AKINYEDE, O., MOHAN, R., KELKAR, A. and SANKAR, J., 2009. Static and Fatigue Behavior of Epoxy Fiberglass Composites Hybridized with Alumina. Journal of Composite Materials, 43(7): 769-781.

ANANDHAN, S. and BANDYOPADHYAY, S., 2011. Polymer Nanocomposites: From Synthesis to Applications, Nanocomposites and Polymers with Analytical Methods John Cuppoletti, IntechOpen, 28s.

AZMI, M. A. and SHAD, K. F., 2017. Nanostructures for Novel Therapy. Chapter 14 – Role of nanostructure molecules in enhancing the bioavailability of oral drugs. Elsevier, 375-407s.

BAZRGARI, D., MOZTARZADEH, F., SABBAGH-ALVANI, A. A., RASOULIANBOROUJENI, M., TAHRIRI, M. and TAYEBI, L., 2018. Mechanical properties and tribological performance of epoxy/Al_2O_3 nanocomposite. Ceramics International, 44(1): 1220-1224.

BORM, P. J. and KREYLING, W., 2004. Toxicological hazards of inhaled nanoparticles potential implications for drug delivery. Journal Of Nanoscience and Nanotechnology, 4 (6): 1–11.

CAMARGO, P. H. C., SATYANARAYANA, K. G. and WYPYCH, F., 2009. Nanocomposites: synthesis, structure, properties and new application opportunities. Materials Research, 12(1): 1-39.

CASATI, R., and VEDANI, M., 2014. Metal Matrix Composites Reinforced by Nano-Particles—A Review. Metals, 4: 65-83.

CHARVANI, S. and REDDY, C. G., 2015. Preparation And Characterisation Of Alumina Nanocomposites With Aramid Fibre And Hybrid Fibre Reinforcements. International Journal of Research in Engineering and Technology, 04(03): 581-585.

DAVIS, J. R. (Ed.), 2004. Tensile testing. ASM international. Ohio, United States of America, 283s.

DENCHEV, Z. and DENCHEVA, N., 2012. Manufacturing And Properties Of Aramid Reinforced Composites. Synthetic Polymer-Polymer Composites, Hanser Publishers, 251-280s.

DENG, C.F., WANG, D.Z., ZHANG, X.X., MA, Y.X., 2007. Damping characteristics of carbon nanotube reinforced aluminum composite. Materials Letters, 61(14-15): 3229–3231.

DONOHUE, J., 1974. The Structures of the Elements. John Wiley & Sons, New York, Sydney, Toronto, 436s.

DOTY, R.C., TSHIKHUDO, T.R., BRUST, M., and FERNIG, D.G., 2005. Extremely Stable Water-Soluble Ag Nanoparticles. Chemistry Material, 17 (18): 4630–4635.

ERKLIG, A., JABBAR, A. and ALSAADI, M., 2016. Tensile and flexural behavior of nano-silica modified carbon/Kevlar hybrid composites. International

Conference on Advanced Technology & Sciences, September 01-03, Konya, p.1151-1154.
ESEN, B., 2011. Hidrotermal Yöntemle Sentezlenen Nano Metal Oksitlerin Fotokatalitik Özelliklerinin İncelenmesi. Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara, 73s.
ESSAM, M., MOHAMMED, S., ABDEL-WANİS, S., MAHMOUD, T., EL-KADY, E., 2017. Surface composite defects of Al/Al2O3 metal matrix fabricated by Friction stir processing. Journal Of Materials Science and Surface Engineering, 5: 524-527.
EVANGELOS, M., 2007. Nanocomposites: Stiffer by design. Nature Materials. 6 (1): 9–11.
FEDLHEIM, D.L. and FOSS, C.A., 2001. Metal Nanoparticles: Synthesis, Characterization, and Applications. CRC Press, 352s.
FERREIRA, J.A.M., REIS, P.N.B., COSTA, J.D.M. and RICHARDSON, M.O.W., 2012. Fatigue behaviour of Kevlar composites with nanoclay-filled epoxy resin. Journal of Composite Materials, 47(15): 1885–1895.
FEYNMAN, R. P., 1960. There's plenty of room at the bottom. Engineering and Science, 22: 22-36.
FUKANO, K. and KAGEYAMA, E., 1976. Study of radiation-induced polymerization of vinyl monomers adsorbed on inorganic substances. Journal of Polymer Science: Polymer Chemistry Edition, 13: 1325-1338.
GRANCHAROV, S.G., ZENG, H., SUN. S., WANG. S.X., O'BRIEN, S., MURRAY, C.B., KIRTLEY, J.R., HELD and G.A., 2005. Bio-functionalization of Monodisperse Magnetic Nanoparticles and Their Use as Biomolecular Labels in a Magnetic Tunnel Junction Based Sensor. Journal of Physical Chemistry B, 109: 13030-13035.
GUO, Z., PEREİRA, T., CHOİ, O., WANG, Y. and HAHN, H. T., 2006. Surface functionalized alumina nanoparticle filled polymeric nanocomposites with enhanced mechanical properties. Journal of Materials Chemistry, 16(27): 2800-2808.
HARISHANAND, K.S., NAGABHUSHANA, H., NAGABHUSHANA, B.M., PANDA, P., GUPTA, R., MURULI, M.S., RAGHAVENDRA, N. and MAHESH K.R.V., 2013. Comparitive Study on Mechanical Properties of ZnO, ZrO2 and CeO2 Nanometal Oxides Reinforced Epoxy Composites. Advances in Polymer Science and Technology: An International Journal, 3(1): 7-13.
HARPER, J. F., MILLER, N. A., and YAP, S. C. 1993. Problems associated with the compression testing of fibre reinforced plastic composites. Polymer testing, 12(1): 15-29.
HASSANZADEH-AGHDAM, M.K., ANSARI, R. and MAHMOODI, M.J., 2018. Micromechanical estimation of biaxial thermomechanical responses of hybrid fiber-reinforced metal matrix nanocomposites containing carbon nanotubes, Mechanics of Materials, 119: 1-15.
HOSUR, M., MAHDI, T., ISLAM, MD. E., TCHERBI-NARTEH, A. AND JEELANI, S., 2015. Fabrication and Performance Of Carbon/Epoxy Composites with Hybrid of Nanoclay and Mwcnts. 20th International Conference on Composite Materials, 19-24th July, Copenhagen.
HOSUR, M., MAHDI, T., ISLAM, MD.E., TCHERBI-NARTEH, A. and JEELANI, S., 2015. Fabrication and performance of carbon / epoxy composites with hybrid

of nanoclay and mwcnts. 20th International Conference on Composite Materials Copenhagen. 20th International Conference on Composite Materials Copenhagen, 19-24th July, Copenhagen, 3403-2.

KADHIM, M. J., ABDULLAH, A. K., AL-AJAJ, I. A., and KHALIL, A. S., 2013. Mechanical Properties of Epoxy/Al_2O_3 Nanocomposites. International Journal of Application or Innovation in Engineering & Management, 2(11): 10-16.

KHALIL, A.K., 2012. Advanced sintering of nano-ceramic materials. Chapter 4 Feng Shi (Ed.), Ceramic materials-progress in modern ceramics, InTech, 228s.

KHASHABA, U. A., 2014. Development and characterization of high performance nano-hybrid GFRE composites for structural applications. Composite Structures, 116: 523-534.

KICKELBICK, G. and SCHUBERT, U., 2003. Organic functionalization of metal oxide nanoparticles. In: Baraton MI (ed) Synthesis, functionalization and surface treatment of nanoparticles. American Scientific Publishers, Stevenson Ranch, 91s.

KNOLL, J. B., RIECKEN, B.T., KOSMANN, N., CHANDRASEKARAN, S., SCHULTE, K. and FIEDLER, B., 2014. The effect of carbon nanoparticles on the fatigue performance of carbon fibre reinforced epoxy. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 67: 233-240.

KOJIMA, Y., FUKUMORI, K., USUKI, A., OKADA A., and KURAUCHI, T., 1993. Gas permeabilities in rubber-clay hybrid, Journal of Materials Science Letters 12(12): 889-890.

KUMAR, S., SARITA, NEHRA, M., DILBAGHI, N., TANKESHWAR, K. and KIM, K., 2018. Recent advances and remaining challenges for polymeric nanocomposites in healthcare applications. Progress in Polymer Science, 80: 1-38.

KUMFU, S., NHUAPENG, W., THAMJAREE, W. and TUNKASIRI, T. 2008. Mechanical Properties and Microstructure of Aramid/Al2O3/Epoxy Resin Laminated Composites. Advanced Materials Research, 55-57: 389-392.

LIANG, W., DUAN, Z., SUN, K., LIANG, H., WANG, Z. and GUO, C., 2017. Mechanical Performance of Nano-Al2O3-Modified Composites at Cryogenic and Room Temperatures. Polymer Composites, 1548-0569.

MANJUNATH, M., RENUKAPPA, N. and SURESHA, B., 2016. Influence of micro and nanofillers on mechanical properties of pultruded unidirectional glass fiber reinforced epoxy composite systems. Journal of Composite Materials, 50(8): 1109-1121.

MIGLIETTA, M., L., RAMETTA, G. and DI FRANCIA, G., 2009. Characterization of Carbon Based Nanoparticles Dispersion in Aqueous Solution Using Dynamic Light Scattering Technique. Macromolecular Symposia, 228(1): 95-100.

MOHANTY, A., SRIVASTAVA, V. K. and SASTRY, P.U., 2014. Investigation of mechanical properties of alumina nanoparticle-loaded hybrid glass/carbon-fiber-reinforced epoxy composites. Journal of Applied Polymer Science, 131(1): 1-7.

MOON, C. and KIM, B., 2015. Nanoparticle Size Effect on Mechanical Properties of Carbon Fiber-reinforced Polymer Composites. Journal of Ocean Engineering and Technology, 29(2): 186-190.

MOON, J.H., SHUL, Y.G., HONG, S.Y., CHOI, Y.S., and KIM, H.T., 2005. A study on UV-curable adhesives for optical pick-up: II. Silane coupling agent effect. International Journal of Adhesion and Adhesives, 25(6): 534-542.

NAEEM, R., AHMED, R. and ANSARI, M. S., 2014. TiO_2 and Al_2O_3 promoted Pt/C nanocomposites as low temperature fuel cell catalysts for electro oxidation of methanol in acidic media. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 23–27 September, Islamabad, Pakistan, p. 012031.

NAITO, M., YOKOYAMA, T., HOSOKAWA, K. and NOGI, K., 2018. Nanoparticle Technology Handbook. Elsevier, 904s.

NAYAK, R. K., DASH, A. and RAY, B.C., 2014. Effect of Epoxy Modifiers (Al_2O_3/SiO_2/TiO_2) on Mechanical Performance of epoxy/glass Fiber Hybrid Composites. Procedia Materials Science, 6: 1359-1364.

NEOUZE, M.A., and SCHUBERT, U., 2008. Surface Modification and Functionalization of Metal and Metal Oxide Nanoparticles by Organic Ligands. Monatshefte für Chemie- Chemical Monthly, 139: 183-195.

NIXON, A., 2016. Understanding Graphene: Part 5 – Polymer nanocomposites. https://investorintel.com/sectors/technology-metals/technology-metals-intel/understanding-graphene-part-5-polymer-nanocomposites/, Erişim tarihi 5 Ekim 2018.

OBERDORSTER, G., OBERDORSTER, E. and OBERDORSTER, J., 2005. Nanotoxicology: an emerging discipline evolving from studies of ultrafine particles. Environ Health Perspect, 113(7): 823-39.

RAJU, B.R., SURESHA, B., SWAMY, R.P. and KANTHRAJU, B.S.G., 2013. Investigations on Mechanical and Tribological Behaviour of Particulate Filled Glass Fabric Reinforced Epoxy Composites. Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering, 1(July): 160-167.

REIS, P.N.B., FERREIRA, J.A.M., ZHANG, Z.Y., BENAMEUR, T. and RICHARDSON, M.O.W., 2013. Impact response of Kevlar composites with nanoclay enhanced epoxy matrix. Composites Part B: Engineering, 46: 7-14.

SALIH, S.I., SALIH, W.M., and HAMEED, M.A.A., 2016. Preparation and Characterization of Polymers Blends Hybrid Nano composites for Structural Applications. Advances in Natural and Applied Sciences, 10(15): 90-103.

SĂNDULESCU, R., TERTIS, M., CRISTEA, C. and BODOKI, E., 2015. New materials for the construction of electrochemical biosensors. Biosensors- Micro and Nanoscale Applications, 1-36.

SHAH, A., WANG, Y., HUANG, H., ZHANG, L., WANG, D., ZHOU, L., DUAN, Y., DONG, X., and ZHANG, Z., 2015. Microwave absorption and flexural properties of Fe nanoparticle/carbon fiber/epoxy resin composite plates. Composite Structures, 131: 1132-1141.

TARAGHI, I., FEREIDOON, A. and MOHYEDDIN, A. 2014. The effect of MWCNTs on the mechanical properties of woven Kevlar/epoxy composites. Steel and Composite Structures, 17(6): 825-834.

THOMAS, S.C., HARSHITA, MISHRA, P.K. and TALEGAONKAR, S., 2015. Ceramic Nanoparticles: Fabrication Methods and Applications in Drug Delivery. Current Pharmaceutical Design, 21(42): 6165-6188.

TWARDOWSKI, T.E., 2007. Introduction to Nanocomposite Materials. DEStech Publications, Lancaster, Pennsylvania, 533s.

URL-1,https://www.shinetsusilicone-global.com/catalog/pdf/SilaneCouplingAgents_e.pdf, Erişim tarihi 12 Aralık 2018.

WANG, B., DUAN, Y. and ZHANG, J., 2016. Titaniumdioxide nanoparticles-coated aramid fiber showing enhanced interfacial strength and UV resistance properties. Materials and Design, 103: 330–338.

XIA, C., SHI, S.Q. and CAI, L., 2015. Vacuum-assisted resin infusion (VARI) and hot pressing for CaCO3 nanoparticle treated kenaf fiber reinforced composites. Composites Part B: Engineering, 78: 138-143.

YANO, K., USUKI, A., OKADA, A., KURAUCHI, T., and KAMIGAITO, O., 1993. Synthesis and properties of polyimide–clay hybrid Journal of Polymer Science, Part A: Polymer Chemistry, 31: 2493-2498.

ZHANG, H., ZHANG, Z. and GUO, F., 2010. A Study on the Sliding Wear of Hybrid PTFE/Kevlar Fabric/Phenolic Composites Filled with Nanoparticles of TiO_2 and SiO_2. Tribology Transactions, 53: 678-683.

ZHANG, Z. and CHEN, D.L., 2008. Contribution of Orowan strengthening effect in particulate-reinforced metal matrix nanocomposites. Materials Science and Engineering A, 483–484: 148–152.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Gökhan DEMİRCAN
Uyruğu : T.C.
Doğum Yeri ve Tarihi : RİZE/08.02.1990
Telefon : 05074988382
Faks :
E-mail : gdemircan@harran.edu.tr

EĞİTİM

Derece	Adı, İlçe, İl	Bitirme Yılı
Lise	: Tuzla Behiye Dr. Nevhiz Işıl Anadolu Lisesi	2008
Üniversite	: Gaziantep Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü	2013

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görevi
2013	: Devinim Teknik	Makina Mühendisi
2014	: Akım Metal	Makina Mühendisi
2016-	: Harran Üniversitesi	Araştırma Görevlisi

UZMANLIK ALANI

Kompozit, Sonlu Elemanlar Yöntemi

YABANCI DİLLER

İngilizce