



T.C.
NECMETTİN ERBAKAN
ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



HALLOYSİT NANOTÜP KATKISININ
KARBON-ARAMİD ELYAF TAKVİYELİ
NANOKOMPOZİTLERİN AŞINMA
DAVRANIŞINA ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Yusuf BAŞTOSUN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim
Dalı

Temmuz-2022
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Yusuf BAŞTOSUN tarafından hazırlanan “Halloysit Nanotüp Katkısının Karbon-Aramid Elyaf Takviyeli Nanokompozitlerin Aşınma Davranışına Etkisinin İncelenmesi” adlı tez çalışması 25/07/2022 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri	İmza
Başkan Prof.Dr. Mesut UYANER
Danışman Dr.Öğr. Üyesi M. Emin ÇETİN
Üye Doç.Dr. M. Hüseyin ÇETİN

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun .../.../20.. gün ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. İbrahim KALAYCI
FBE Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Yusuf BAŞTOSUN

27.07.2022

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HALLOYSİT NANOTÜP KATKISININ KARBON-ARAMİD ELYAF TAKVİYELİ NANOKOMPOZİTLERİN AŞINMA DAVRANIŞINA ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Yusuf BAŞTOSUN

Necmettin Erbakan Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Emin ÇETİN

2022, 65 Sayfa

Jüri

Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Emin ÇETİN
Prof.Dr. Mesut UYANER
Doç.Dr. M. Hüseyin ÇETİN

Bu tez çalışmasında, karbon-aramid elyaf takviyeli hibrit nanokompozitler, halloysit nanotüp (HNT) katkısıyla modifiye edilmiş epoksi matris kullanılarak vakum destekli bir el yatırma yöntemi ile üretilmiştir. Saf karbon-aramid elyaf takviyeli hibrit kompozitler ve HNT katkılı karbon-aramid elyaf takviyeli hibrit kompozitlerin sertlik ölçümleri ASTM D785-08 standardına göre Brinell sertlik testi kullanılarak, aşınma testleri ASTM G99 standardına göre yapılmıştır. 10N, 15N, 20N yükler altında ve 1 m/s kayma hızında numunelerin tribolojik performansını incelemek için aşınma testleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, hibrit kompozitlerin tribolojik davranışı üzerindeki HNT'lerin etkilerini araştırmak için aşınma hızı ve sürtünme katsayısı sonuçları da kullanılmıştır. Saf ve HNT katkılı numunelerin aşınma mekanizması taramalı elektron mikroskopi (SEM) görüntüleri ile belirlenmiş, aşınmış yüzeylerin element analizi ise enerji dağılımlı X-ışını (EDX) kullanılarak elde edilmiştir. Daha sonra, yüzey morfolojisi 3 boyutlu topografi görüntüleri ile değerlendirilmiş, aşınma üzerinde HNT'lerin ısı iletkenlik etkisini belirlemek için termal kamera görüntüleri kullanılmıştır.

Aşınma test sonuçları, HNT'lerin kompozite eklenmesiyle birlikte sürtünme katsayısını 10N, 15N ve 20N yükler için sırasıyla %9, %10 ve %11 oranında azalttığını göstermiştir. Aşınma miktarı da aşınma yükleri için ortalama %75 oranında azaltılmıştır. 3 boyutlu topografiden elde edilmiş yüzey form görüntüleri, sürtünme katsayısı ve aşınma miktarı değerlerindeki azalışı desteklemiştir. Termal kamera görüntüleri, temas bölgesindeki ısı iletkenlik gelişiminin HNT'lerden kaynaklandığını göstermiştir. Ayrıca, HNT'lerin tribofilm oluşturma gibi katı yağlayıcı özelliği, nanokompozitlerin tribolojik performansındaki artışın ana nedeni olarak belirlenmiştir. Son olarak, SEM görüntülerinden yola çıkarak HNT takviyeli karbon-aramid hibrit kompozitlerin aşınma davranışını açıklamak için detaylı bir aşınma mekanizması önerilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Aşınma, Halloysit Nanotüp, Karbon-Aramid Hibrit, Nanokompozit, Tribofilm

ABSTRACT

MS THESIS

EXAMINATION OF THE EFFECT ON WEAR BEHAVIOR OF CARBON- ARAMID FIBER REINFORCED NANOCOMPOSITES WITH THE HALLOYSITE NANOTUBE MODIFICATION

Yusuf BAŞTOSUN

**Necmettin Erbakan University
Institute Of Science
Department Of Metallurgical and Materials Engineering**

Advisor: Assistant Professor Mehmet Emin ÇETİN

2022, 65 Pages

Jury

Asst.Prof.Dr. Mehmet Emin ÇETİN

Prof.Dr. Mesut UYANER

Asst.Prof.Dr. M. Hüseyin ÇETİN

In this thesis, carbon-aramid fiber reinforced hybrid nanocomposites were produced using a vacuum assisted hand lay-up method using hallocite nanotubes (HNTs) modified epoxy matrix. Hardness measurements of neat carbon-aramid fiber reinforced hybrid composites and HNTs-added carbon-aramid fiber reinforced hybrid composites were performed using Brinell hardness test according to ASTM D785-08 standard, and wear test are performed according to ASTM G99 standard. The wear tests are performed on the ball-on-disk to analyze the tribological effect of neat and HNTs-added specimens at 10, 15, and 20 N loads and 1 m/s sliding speed. In addition, wear rate and friction coefficient results are also provided to explore the effects of HNTs on the tribological behavior of hybrid composites. The wear mechanism of the neat and HNT-added specimens was determined by scanning electron microscopy (SEM) images, and elemental analysis of the worn surfaces was obtained using energy dispersive X-ray (EDX). Then, the surface morphology was evaluated with 3D topography images, and thermal camera images were used to determine the thermal conductivity effect of HNTs on wear.

The wear test results showed that the addition of HNTs to the composite reduced the coefficient of friction by 9%, 10%, and 11% for 10N, 15N, and 20N loads, respectively. The wear rate is also reduced by an average of 75% for wear loads. The surface form images obtained from the 3D topography supported the increase in the friction coefficient and wear rate values, and the thermal camera images showed that the thermal conductivity development in the contact area showed that the HNTs have good thermal properties. In addition, the solid lubricant property of HNTs such as tribofilm formation was determined as the main reason for the increase in the tribological performance of nanocomposites. Finally, a detailed wear mechanism is proposed to explain the wear behavior of HNTs reinforced carbon-aramid hybrid composites based on SEM images.

Keywords: Wear, Halloysite Nanotube, Carbon-Aramid Hybrd, Nanocomposite, Tribofilm

ÖNSÖZ

Tez çalışmalarım boyunca konu belirlemesinden son aşamaya gelene kadar birçok konuda yol gösteren, yoğun iş temposuna rağmen değerli vakitlerini ayırarak bana destek olan ve yardımlarını esirgemeyen, lisans eğitimime başladığımdan beri tecrübeleriyle bana ışık tutan tez danışmanım saygıdeğer hocam Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Emin Çetin'e teşekkür ederim.

Numune üretimi boyunca ve sonrasında tecrübelerini paylaşarak yardımcı olan Arş. Gör. Ahmet Caner TATAR'a gösterdiği destek için teşekkürlerimi sunarım.

İhtiyacım olduğunda bilgi birikimlerinden yararlandığım, kıymetli tavsiye ve yardımlarını esirgemeyen Prof. Dr. Ahmet AVCI 'ya ayrıca teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak, eğitim hayatımın her döneminde en büyük pay sahibi olan, bana maddi ve manevi destek olduğundan emin olduğum, hiçbir fedakarlıktan kaçınmayan aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Yusuf BAŞTOSUN
KONYA-2022

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR	ix
1. GİRİŞ	1
1.1. Kompozit Malzemeler	1
1.1.1. Matris Yapılı Kompozit Malzemeler	4
1.1.2. Polimer Yapılı Matris Kompozitler	5
1.1.2.1. Termoplastikler	6
1.1.2.2. Termosetler	7
1.1.3. Polimer Yapılı Matris Kompozitlerin Üretim Yöntemleri	8
1.1.3.1. El Yatırma Yöntemi	10
1.1.3.2. Elyaf Sarma Yöntemi	11
1.1.3.3. Püskürtme Yöntemi	11
1.1.3.4. Vakum torbası Yöntemi	12
1.1.3.5. Otoklav Yöntemi	13
1.1.4. Elyaf Takviyeli Kompozitler	14
1.2. Karbon-Aramid Elyaf Takviyeli Polimer Kompozit Malzemeler	17
1.2.1. Karbon Elyaf Takviyeli Polimerler	17
1.2.2. Aramid (Kevlar) Elyaf Takviyeli Polimerler	21
1.3. Halloysit Nanotüp (HNT)	22
1.4. Nanokompozit Malzemeler	25
1.5. Sürtünme	27
1.5.1. Sürtünmeyi Etkileyen Faktörler	27
1.6. Aşınma	28
1.6.1. Adhezif Aşınma	28
1.6.2. Abrasif Aşınma	29
1.7. Taramalı Elektron Mikroskopu (SEM)	29
1.8. Enerji Yayınımlı X-ışını (EDX)	31
1.9. Tezin Kapsamı	31
1.10. Tezin Ana Hattı	32
1.11. Tezin Amacı	32
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	34
2.1. Literatür Araştırması	34
2.2. Literatürde Oluşan Boşluklar	38
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	39
3.1. Karbon-Aramid Fiber Takviyeli Hibrit Kompozitlerin Üretimi	39
3.2. Tribolojik Testler	41

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	43
4.1. Tribolojik Performans.....	43
4.2. Kuru Kaymalı AŞınma Mekanizması	56
4.3. Mekanik Performans.....	59
5. SONUÇLAR.....	60
6. KAYNAKLAR	61



SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

W_s	: Özgül aşınma oranı (mm^3/Nm)
Δ_m	: Aşınan numunenin ağırlık kaybı (g)
ρ	: Numune yoğunluğunu (g/mm^3)
F_N	: Uygulanan yük (N)
L	: Kayma mesafesi (m)

Kısaltmalar

ASTM	: American Society for Testing and Materials (Amerikan test ve materyalleri topluluğu)
DMA	: Dinamik mekanik analizi
EDX	: Enerji yayımlı x-ışını
FTIR	: Fourier dönüşümlü kızıl ötesi spektrometresi
GNP	: Grafen nanoplatelet
HNT	: Halloisit nanotüp
Kaol	: Kaolinit nanotabakalar
MWCNT	: Çok duvarlı karbon nanotüpler
PA	: Poliamid
PAN	: Poliakrilonitril
PC	: Polikarbonat
PEEK	: Polietereterketon
PEI	: Polietilemin
PLC	: Programlanabilir mantık kontrolü
PP	: Polipropilen
PPS	: Polifenilen sülfid
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu
TEM	: Transmisyon elektron mikroskobu
USP	: Ultrasonik sprej piroliz

1. GİRİŞ

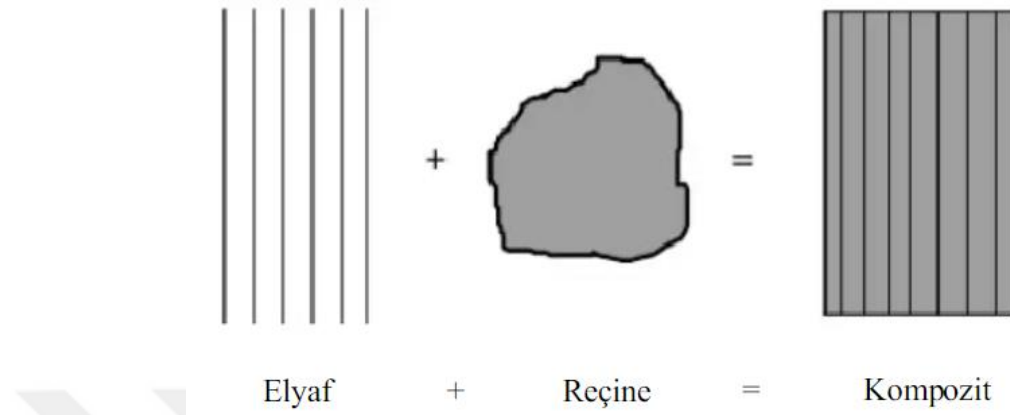
‘Kompozit’ kelime olarak; makro ölçüde birbiriyle aynı olmayan metal, seramik ve plastik yapılu malzemeler içinden iki veya daha fazla malzemenin belirlediğimiz özelliklerini bir ara yüzey boyunca tek bir malzeme adı altında toplamak veya yeni mekanik özelliklere sahip başka bir malzeme meydana getirmek için farklı prosedürlerin uygulanmasıyla birleştirilen malzemelerdir. Kompozit malzemeleri meydana getiren bileşenler genellikle kendilerine ait olan özellikleri muhafaza ederler (Rosato, 1997).

İlk çağlardan beri insanlar kırılğan olan malzemelerin içerisine hayvansal veya bitkisel lifleri ekleyerek kırılğanlıklarının gittiğini görmüşlerdir. Bu açıklamaya en iyi örnek saman katkılı kerpiç tuğlalardan yapılan evler olarak gösterilebilir. Kompozit malzemeler üzerindeki mühendislik bilgisi bakımından ilk çalışma 1940’lı yılların başlarında gerçekleştirilmiştir. Daha sonra cam elyaf bulunarak modern kompozit üretilmeye ve cam elyaf katkılı kompozitler dünya üzerinde aktif olarak kullanılmaya başlanmıştır. Şimdilerde kullanım maliyetleri çok daha azalmış olup kullanım alanları da buna nispeten artmaktadır. Kompozit malzemeler yapısı bakımından değerlendirildiğinde yeni ve ileri teknolojiye ayak uyduran malzemeler olarak dikkat çekmektedir. Kompozit malzemelerin en önemli özelliği ise mikro düzeyde homojen olmasıdır.

Günümüzde cam, karbon, aramid elyaf vb. takviyeli kompozit malzemelerin kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır. Bu üç sınıfın birbirlerine göre bazı avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır. Aramid ve karbon elyaf kompozitler düşük yoğunluğa, yüksek darbe dayanımına, yüksek aşınma dayanımına, yüksek yorulma dayanımına ve titreşim sönümlenme özelliklerine sahiptirler. Aynı zamanda manyetik değillerdir ve üretimde kolaylık sağlarlar. Bu özelliklerinden dolayı, özellikle aramid elyaflar balistik koruma uygulamaları (askeri kasklar, kurşun geçirmez yelekler vb.), uzay ve uçak sanayi, otomotiv sanayi vb. bir çok uygulama alanlarına sahiptirler. Bunların yanı sıra elyaf takviyeli polimer kompozitler de denizcilik uygulamalarında yaygın bir şekilde kullanılmaktadırlar. Kanolarda, balıkçı teknelerinde, devriye botlarında, sondaj platformlarında, güverte ızgaralarında, köprü ve iskele direklerinde ve yenilenebilir enerji cihazlarında geleneksel monolitik malzemelere göre daha çok tercih edilmektedirler.

1.1. Kompozit Malzemeler

Kompozit, ileri teknolojik gelişmelerle sınırlı olarak, bu malzemelerden iki veya daha fazlasının farklı özelliklerini tek bir malzeme adı altında toplanması amacıyla makro düzeyde birleştirilerek üretilen yeni malzemelerdir (Şekil 1.1) (Kaya, 2016).

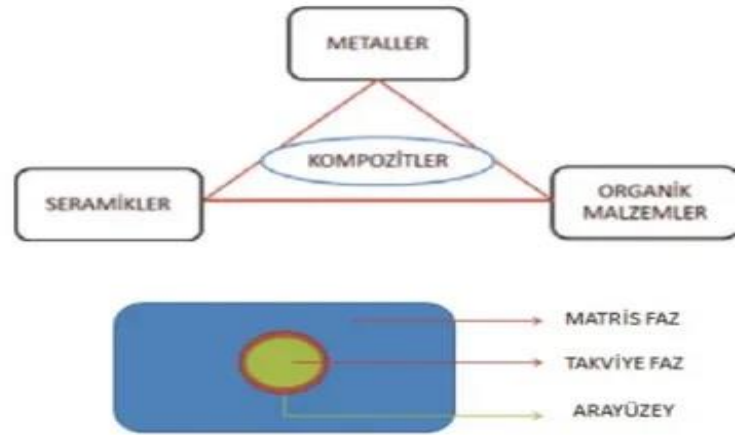


Şekil 1.1. Kompozit Malzemelerin Basit Gösterimi (Mazumdar, 2002)

Kompozit malzemelerin başlıca amacı, meydana getirilmesinde aşağıda kısaca açıklanmış olan özelliklerin bazılarının geliştirilmesidir. Bunlar;

- Mukavemet,
- Korozyon dayanımı,
- Termal dayanım,
- Kırılma Tokluğu,
- Elektrik iletkenliği,
- Akustik iletkenlik,
- Ağırlık,
- Rijitlik,
- Estetik görünüm,
- Fiyat

ve bunun gibi benzer özellikler şeklinde sıralanabilir.

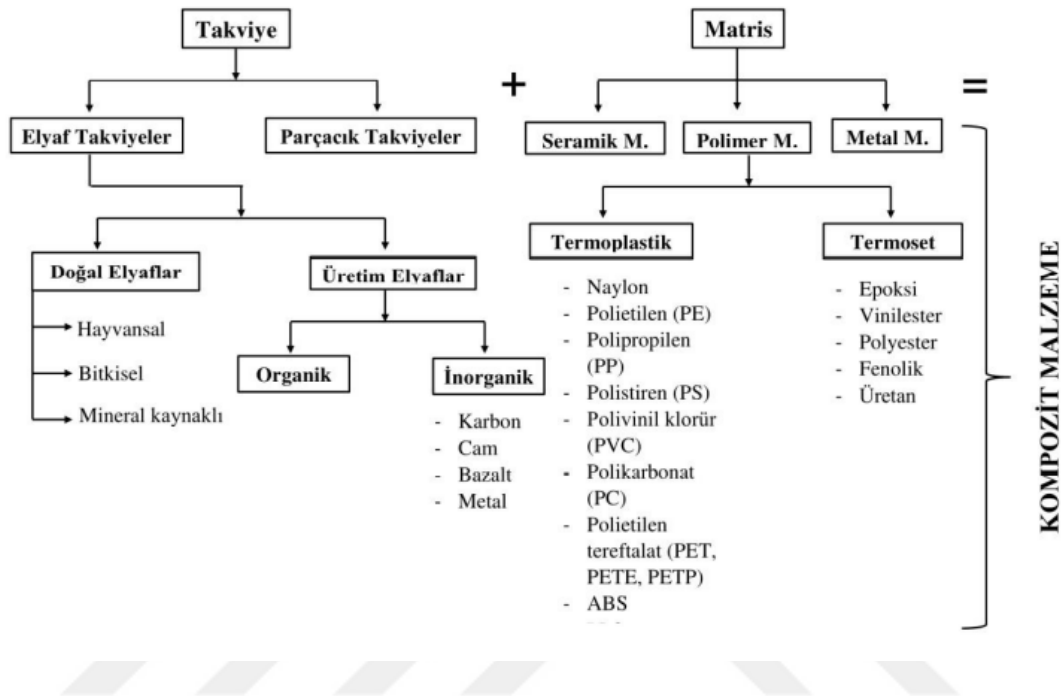


Şekil 1.2. Kompozit Malzemelerin Yapısı (Kaya, 2016)

Yukarıda yapısı verilen kompozit malzemeler matris ana fazdan ve içerisindeki takviye fazlardan oluşurlar. Matris faz kısmı, malzeme üzerine uygulanan bir kuvveti ara yüzey kısmının yardımıyla takviye faz kısmına ulaştırır ve kuvveti yapının içerisine dağıtır. Bu olay sayesinde planlanmış bir şekilde takviye faz kısmının tahribatını engellemiş olur. Takviye faz kısmının üzerine düşen görevleri yerine getirebilmeleri için yukarıda saymış olduğumuz mekanik özelliklerin önemi büyüktür. Bu kısım aynı zamanda üretim esnasında malzemenin tanecik büyüklüğünü kontrol eder. Matris faz ile takviye faz kısımları arasındaki iletişimi sağlayan ara yüzey kısmı ise, ortaya çıkan herhangi bir kuvvetin kopmadan veya çözülmeden takviye faz kısmına ulaşmasını sağlar. Bu kısım aynı zamanda malzemenin esneklik katsayısını etkileyen en önemli bölgedir. Bu yüzden meydana getirdiğimiz kompozit malzemelerin mukavemeti, ara yüzey fazının istenilen şartlarda olmasına bağlıdır (Qu, 1993).

Aşağıdaki kompozitin sınıflandırılmasını açıklayacak olursak takviye faz kısmı kendi içerisinde 2 gruba ayrılır. Bunlar; elyaf takviyeler ve parçacık takviyelerdir. Elyaf takviye kısmı da doğal elyaflar ve sentetik (üretim) elyaflar olarak sınıflandırılırlar. Doğal elyaflar hayvansal, bitkisel ve minarel kaynaklı lifler olarak 3 gruba ayrılır. Hayvansal lifler (yün, kaşmir, deve tüyü, doğal ipek) kimyasal olarak proteinlerin yapılarında bulduklarından dolayı protein elyaf olarak da bilinirler. Bitkisel lifler (pamuk, keten, kenevir, kendir) yapılarında %60 - %90 arasında selüloz maddesi içerdiklerinden dolayı selülozik elyaf olarak da bilinirler. Son olarak mineral kaynaklı lifler (asbest, amyant) kristal yapıya sahip olan elyaf çeşitidir. Sentetik elyaflar organik ve inorganik (karbon, cam, bazalt, metal) olarak 2 sınıfa ayrılırlar. Matris faz kısmı

polimerler, metaller ve seramikler adı altında 3 gruba ayrılırlar (Hahn ve Tsai, 1980). Bu 3 grubun arasından en yaygın olarak kullanılan sınıf polimer sınıfıdır. Polimer sınıfı termoplastik (nylon, polietilen, ABS) ve termoset (epoksi, vinilester, üretan, polyester) olarak 2 gruba ayrılmaktadır.



Şekil 1.3. Kompozit malzemelerin sınıflandırılması (İnce, 2014)

1.1.1. Matris Yapılı Kompozit Malzemeler

Kompozit yapılarda matrislerin birden çok görevi vardır. Bunlardan bazıları, gelen kuvvetleri elyaflara ileterek onların bir arada tutulmalarını sağlamak, kompozit malzemelerdeki tokluğu arttırmak, kompozitler üzerinde çatlakların oluşmasını veya oluşan herhangi bir çatlakın ilerlemesini engellemek, ortaya çıkan yükü elyaflara eşit bir şekilde dağıtmak ve elyafları çevresel faktörlerden korumaktır. Aranılan özelliklere sahip bir matris malzemesi ilk olarak düşük vizkositeli bir yapıya sahip olmasına rağmen daha sonra elyafları sağlam ve uygun şekilde çevreleyebilecek katı görünümlü bir forma kolaylıkla geçebilmelidir. Kompozit malzemelerde yükü taşıyan elyaf yapıların fonksiyonları yerine getirmeleri açısından matris malzemelerin mekanik özelliklerinin alacağı rol çok büyüktür. Örneğin matris malzemesi olmaksızın bir elyaf topluluğu düşünüldüğünde yükler bir veya daha fazla elyaf tarafından taşınacaktır. Matris yapının varlığı ise yüklerin görev alacak tüm elyaflara eşit olarak dağılmasını sağlayacaktır.

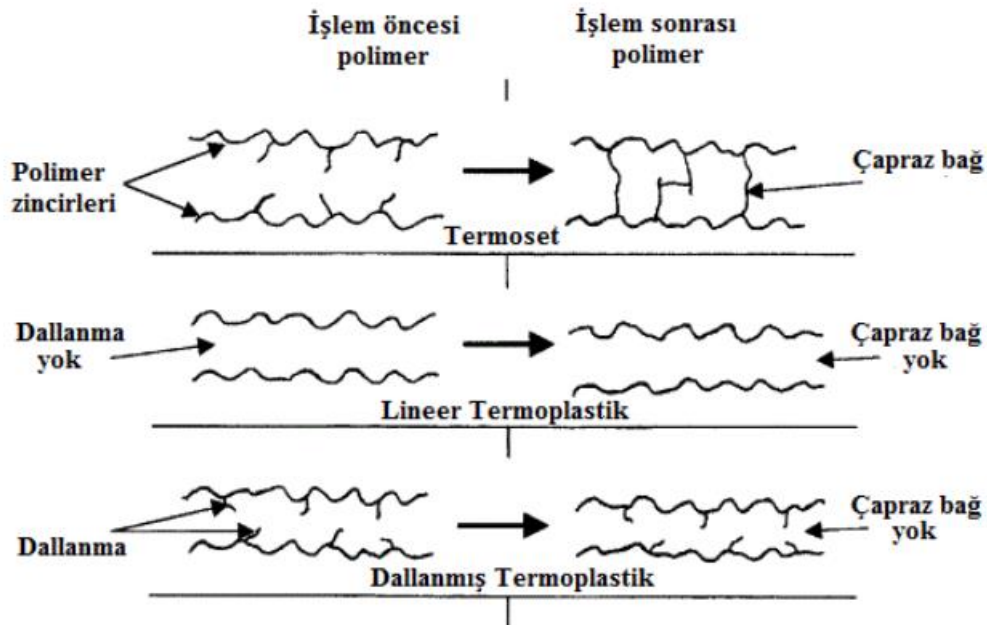
Matris yapılar elyaf yapılara göre daha zayıf ve esnektir. Bu farklılık kompozit malzeme yapılarının tasarımında dikkat edilmesi gereken önemli bir özelliktir.

1.1.2. Polimer Yapılı Matris Kompozitler

Günümüzde polimer yapıları matris kompozitler en yaygın olarak kullanılan mühendislik malzemelerinden biri haline gelmiştir. Bu durumun ana sebebi olarak karbon, polietilen, aramid gibi yüksek performansa sahip elyaflar üzerindeki gelişmeler ve matris malzemesi olarak kullanılan polimerlerin üzerindeki gelişmeler gösterilebilir.

Polimer yapıları kompozitler farklı yöntemler kullanılarak üretilmektedir. Üretilmek istenen parçanın kalitesi, miktarı ve maliyeti, üretimde kullanılan yöntemi etkileyecek önemli özelliklerdendir. Bu bahsettiğimiz yöntemler açık kalıplama yöntemleri (elle yatırma, püskürtme, torba ile kalıplama, elyaf sarma) ve kapalı kalıplama yöntemleri (reçine transfer kalıplama, profil çekme, ekstrüzyonla kalıplama, hazır kalıplama, enjeksiyonla kalıplama, savurma kalıplama) olarak iki kısma ayrılır.

Polimer yapıları matrisler sıcaklık üzerindeki tepkilere göre termoplastik ve termoset olarak iki başlık altında incelenir. Termoplastik ve termosetleri kıyaslayacak olursak, termosetler çoğunlukla bir reçine, kürlenme maddesi, katalizör ile formülize edilirler. Termoplastikler ise sadece zayıf van der Waals etkileşimi ile birbirlerine bağlanan uzun yapıları moleküller zincirlerinin bir araya gelmesiyle oluşurlar.



Şekil 1.4. Termosetlerin ve termoplastiklerin şematik olarak karşılaştırılması (Campbell, 2004b)

Polimer yapılı matris kompozitler;

- Havacılıkta iniş takımı yapısında, kuyruk yapısında, kontrol yüzeylerinde ve kaplama bölgelerinde,
- Otomotiv alanında,
- Uyduların yapısında (destek amaçlı, yüksek rijitlik),
- Spor uygulamalarındaki raketlerde ve hokey sopalarında kullanılır.

1.1.2.1. Termoplastikler

Termoplastik yapılar ısıya maruz kaldıklarında yumuşayan, soğutulduklarında ise tekrar sertleşen plastiklerdir. Isıl plastik olarak da bilinmektedir. Yapılarında kovalent ve van der waals bağlarına sahiptirler. Normal şartlar altındaki tüm polimerler düşük sıcaklıkta katı özellik (elastisite ve kayma modülü) göstermelerine rağmen termoplastikler tekrar tekrar eritilebilir ve çözülebilirler. Bu özelliklerinden dolayı doğayı korumaları ve geri dönüşümleri önem arz etmektedir.

Termoplastik polimer çeşitleri fazla olmasına rağmen matris olarak kullanılan çeşitleri sınırlı sayıdadır. Bunlardan biri polipropilen ve naylon gibi performansları düşük olan emtia plastikler, bir diğeri ise polietereterketon (PEEK) gibi yüksek sıcaklıklarda performansları yüksek olan plastiklerdir (Sims ve Broughton, 2000). Matris olarak kullanımları termosetlere göre daha az olmasına rağmen kırılma tokluğu, raf ömür uzunluğu, geri dönüşümü ve mukavemeti için organik olan çözücülere ihtiyaçları olmamasından ötürü güvenli çalışma ortamı sunmaları tercih edilme sebeplerinden bazılarıdır.

Çizelge 1.1. Matrisler için kullanılan termoplastik reçinelerin çeşitleri ve temel özellikleri (Şükür, 2020)

Termoplastik Çeşitleri	Maks. İşlem ve Erime Sıcaklığı (°C)	Temel Özellikleri
PP- Polipropilen	110-190	En düşük yoğunluğa sahip ticari plastiktir. Eritilip kullanılma özelliğine sahiptir. Asit ve bazlara karşı yüksek dayanım istenen yerlerde tercih edilir. Mekanik dayanımları iyidir. Saydam oldukları için cam yerine kullanılabilir. Darbe dayanımları iyi olduğu için güvenlik camı olarak kullanılır.
PC-Polikarbonat	120-220	Çoğu organik çözücüye karşı etkisizdir ve alkali ve tuz çözeltilerine karşı dirençlidir. Güçlü mineral asitler ve oksitleyici maddelerin saldırılarına uğrar.
PA-Poliamid (Naylon)	170-270	Organik çözücülere karşı en iyi direnç gösteren plastiktir. Güçlü alkalilerden veya sulu organik tuz çözeltilerinden etkilenmez.
PPS-Polifenilen sülfid	240-340	En yüksek sıcaklıkta kullanılabilen plastiktir.
PEEK-Polietereketon	250-390	

Termosetlere kıyasla en önemli avantajları yüksek darbe dirençleridir. Böyle olmaları daha fazla hasarı tolere edebilmelerini sağlar. Bu yapılarda mikro çatlaklar oluşma ihtimali düşüktür. Kompozit üretimler zordur çünkü ergiyik halinde bile viskoziteleri oldukça yüksektir. Bu durum termoplastik kompozitlerin oldukça yavaş bir şekilde geliştirilmesine neden olur. Yapışkanı göstermezler ve taşınmaları daha kolaydır. Sınırsız olarak raf ömürleri vardır. Kalıplanmaları sırasında ortaya çıkan herhangi bir zehirli gaz yoktur. Sonradan şekilleri değiştirilebilir. Kolaylıkla geri dönüştürülebilir. Kristallenmeye bağlı olarak çekme oluşabileceği için kalıplama sonrasında herhangi bir işleme ihtiyaç duymazlar. Termoset reçinelerin geliştirilmesiyle birlikte artık termoplastiklerin yerini yavaş yavaş termosetler almaya başlamıştır.

1.1.2.2. Termosetler

Isıtıldıklarında her zaman bir katılaşma görülmektedir. Termoplastikler gibi bir daha asla tekrar tekrar eski haline dönmezler. Örneğin yumurtayı ısıtıp katı hale getirdikten sonra tekrar sıvı hale gelmediği gibi termosetlerde bu şekilde eski haline dönmezler. Çoğu termoset polimer matrisler sertleşmemeleri için dondurularak depo edilmek zorundadır. Termoset matrisler genellikle lif katkılı kompozitlerin üretiminde kullanılır ve sıvı halde bulunurlar. Katılaştırıcı bir katkı maddesiyle önce jel haline

gelir, daha sonra katılırlar. Genellikle polikondenzasyon yöntemi ile üretilirler. Termoset reçineler izotropiktirler. Lif katkılı kompozit üretiminde vizkositelerinin düşük olmaları nedeniyle daha çok tercih edilir. Isıtılma esnasında yapılarında kovalent çapraz bağlanmalar oluşur. Bu şekildeki bağlanmalar eğme ve dönme hareketlerini engellemektedir.

Termoset polimer matrislere alkidler, aminolar, siyanat esterler, epoksi reçineler, fenolikler, polyesterler, poliüretanlar, elastomerler ve bismaleimidler örnek olarak verilebilirler. Epoksiler diğerlerine göre daha düşük ve orta dereceli sıcaklıklarda (275 ° F 'ye kadar) sıklıkla kullanılan reçine türleridir. Bismaleimidler normal şartlarda 275–350 °F sıcaklıklar aralığında kullanılır. Polyesterler de epoksiler gibi yüksek sıcaklıklarda kullanılabilir ve günümüzde ticari uygulamalarda tercih edilmektedir. Ayrıca daha farklı özelliklerinden dolayı yüksek performanslı kompozit matrisler için de tercih edilebilirler. Daha yeni bir reçine sınıfı olan siyanat esterler, diğerlerine göre yüksek elektriksel özelliklere sahip ve nem eğilimi düşük olması sebebiyle epoksilere ve bismaleimidlere karşı alternatif olarak üretilmiştir. Ancak siyanat esterlerin maliyetleri diğerlerine göre oldukça yüksek olduğu için kullanım alanları daralmıştır. Duman, sis ve yangınlara karşı daha dayanıklı olan ve uçak yapılarında sık sık kullanılan, yüksek sıcaklığa duyarlı bir diğer reçine türü de fenoliklerdir.

Çizelge 1.2. Matrisler için kullanılan termoset reçinelerin çeşitleri ve temel özellikleri (Şükür, 2020)

Termoset Çeşitleri	Temel Özellikleri
Epoksiler	Kopma mukavemeti yüksek, yüksek aşınma direncine sahip, uçucu olmayan ve kimyasal dirençleri yüksek olan reçine türüdür. Düşük ve yüksek sıcaklıkta sertleşebilir ve elyaf yapılarında bağlardaki mukavemeti yüksektir. Uçak ve uzay uygulamalarında kullanılır.
Vinilesterler	Polyesterlere göre daha yüksek maliyetli olup esterlere karşı dirençleri iyidir. Genel olarak otomotiv, denizcilik, kimya ve elektriksel uygulamalarda kullanılır.
Fenolikler	Katı kalıp bileşenlerinde kullanılır. Isıl dirençleri yüksektir ve asitlere karşı oldukça dirençlidir.
Polyesterler	Maliyetleri oldukça düşük, çevresel dayanımları oldukça iyidir. Üretimi kolaydır, takviyelerin üzerindeki nemleri kolayca dışarı atılmasına izin verirler. Genel olarak otomotiv, denizcilik, kimya ve elektriksel uygulamalarda kullanılır.
Polimidler	Yüksek sıcaklık uygulamalarında tercih edilir. 250-300 °C servis sıcaklığına sahiptir.

1.1.3. Polimer Yapılı Matris Kompozitlerin Üretim Yöntemleri

Polimer matrisli kompozitler aşağıda yazılmış olan yöntemler ile üretilmektedir. En uygun yöntemin belirlenmesi, takviye malzemesine, matrise, üretilmek istenen ürünün kalitesine, istenilen miktara ve özelliklere, zamana, ürünün şekline ve kullanılmak istenen yere göre değişiklik göstermektedir. Tablo 1.3'de polimer matrisli kompozitlerin üretim yöntemlerini belirlemede kullanılan özellikler verilmiştir. Üretim yöntemleri açık kalıplama ve kapalı kalıplama yöntemleri diye iki kısıma ayrılır.

Açık Kalıplama Yöntemleri

- El yatırma yöntemi,
- Elyaf sarma yöntemi,
- Püskürtme yöntemi,
- Vakum torbası yöntemi,
- Otoklav yöntemidir.

Kapalı Kalıplama Yöntemleri

- Pultrüzyon yöntemi,
- Enjeksiyonla kalıplama,
- RTM (Reçine transfer kalıplama) yöntemi,
- Ekstrüzyonla kalıplama,
- Islak yatırma yöntemi,
- Hazır kalıplama yöntemleri,
- Rulo sarma yöntemidir.

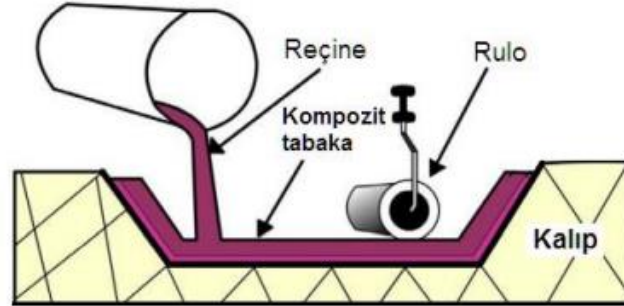
Çizelge 1.3. Polimer matrisli kompozitlerin üretim yöntemlerini belirlemede kullanılan özellikler (Mazumdar S., 2002)

Üretim Yöntemi	Üretim Hızı	Ücret	Güç	Boyut	Şekil	Hammadde
El yatırma	Yavaş	Yüksek	Yüksek	Küçükten büyüğe	Basitten karmaşığa	Prepreg ve kumaş ile epoksi reçine
Elyaf sarma	Yavaştan hızlıya	Düşükten yüksek fiyata	Yüksek	Küçükten büyüğe	Silindirik ve Asimetrik	Sürekli fiberler / epoksi ve polyester reçineler
Püskürtme	Orta hızdan hızlıya	Düşük	Düşük	Küçükten orta büyüklüğe	Basitten karmaşığa	Reçine ile kısa fiber
Basınçlı Kalıplama	Hızlı	Düşük	Orta	Küçükten orta büyüklüğe	Basitten karmaşığa	Hazır kalıplama bileşenleri (SMC, BMC)
Pultrüzyon	Hızlı	Düşükten orta fiyata	Yüksek (boyuna yönde)	Uzunluk kısıtlaması yok, küçükten orta büyüklüğe kesit	Sabit kesit	Sürekli elyaflar / polyester ve vinilester reçineler
Enjeksiyonla kalıplama	Hızlı	Düşük	Düşükten ortaya	Küçük	Karmaşık	Termoplastik ile kısa lif
RTM yöntemi	Prepregler	Düşükten orta fiyata	Orta	Küçükten orta büyüklüğe	Basitten karmaşığa	Vinilester ve epoksi ile preform ve kumaş
İplik sarma	Yavaştan hızlıya	Düşükten yüksek fiyata	Yüksek	Küçükten büyüğe	Silindirik ve Asimetrik	Sürekli fiberler / epoksi ve polyester reçineler
Islak yatırma	Yavaş	Orta	Ortadan yükseğe	Orta büyüklükten büyüğe	Basitten karmaşığa	Kumaş ile polyester ve epoksi reçineler
Rulo sarma	Orta hızdan hızlıya	Düşükten orta fiyata	Yüksek	Küçükten orta büyüklüğe	Boru şeklinde	Prepregler

1.1.3.1. El Yatırma Yöntemi

Bu yöntemde, öncelikle hazırlanmış olan kalıp iyice temizlenir ve içerisine jelkot sürülerek kurumaya bırakılır. Ardından kurumuş olan jelkotun üzerine dokuma kumaşa benzeyen elyaflar elle yatırılarak herhangi bir alet ile reçinenin elyaflar arasına nüfus etmesi sağlanır. Üretilmek istenen kalınlık derecesine kadar her katman için bu işlem ayrı ayrı yapılır. İşlem sona erdikten sonra elyaflar arasında hava kabarcıkları oluşur. Bu kabarcıklar şekilde görüldüğü gibi bir rulo yardımı ile yok edilmektedir. Normal şartlarda reçineler, önceden sürülmüş olan jelkottan dolayı kürleşirler. Ancak istenilen sertlik elde edilemediği takdirde farklı bir ısıl işlem de uygulanabilir. El

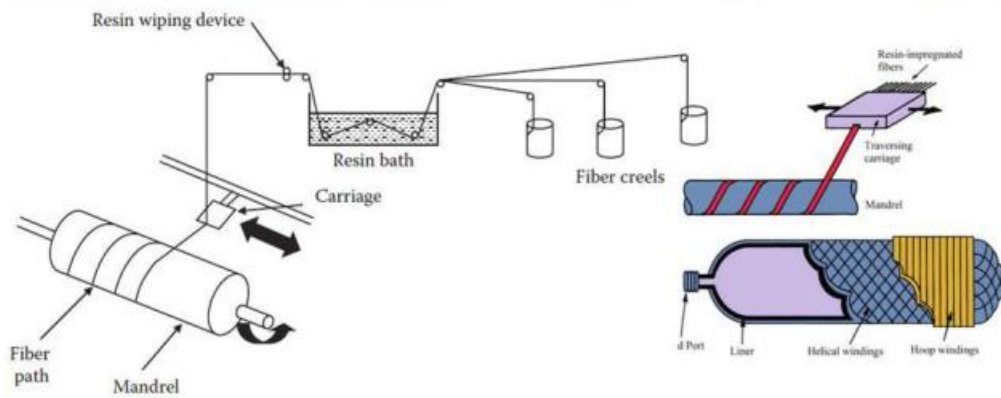
yatırma yönteminde termoset reçine çeşitleri, aramid elyafların çoğunluğu, karbon elyaflar ve cam elyaflar kullanılabilir. Avantajları olarak üretim maliyetinin düşük olması ve çok fazla bilgiye ihtiyaç duymadan kullanılabilir olmasını verebiliriz.



Şekil 1.5. El yatırma yöntemi (Karol & Ürkmez, 2019)

1.1.3.2. Elyaf Sarma Yöntemi

Bu yöntem belirli bir şekle sahip malzemeler için tercih edilmektedir. Sürekli elyaflar reçine ile nüfus ettikten sonra üretilmek istenen malzemenin özelliklerine göre hızı ve açısı belirlenerek silindir şeklindeki mandrelin etrafına sarılır. İstenilen malzeme oluştuktan sonra sürekli elyaflar mandrelden ayrılır. Bu işlem daha çok silindir şeklindeki uygulamalar için, örneğin roket gövdelerinde, basınçlı kap, boru, araba şaftlarında, yakıt tanklarında kullanılır.

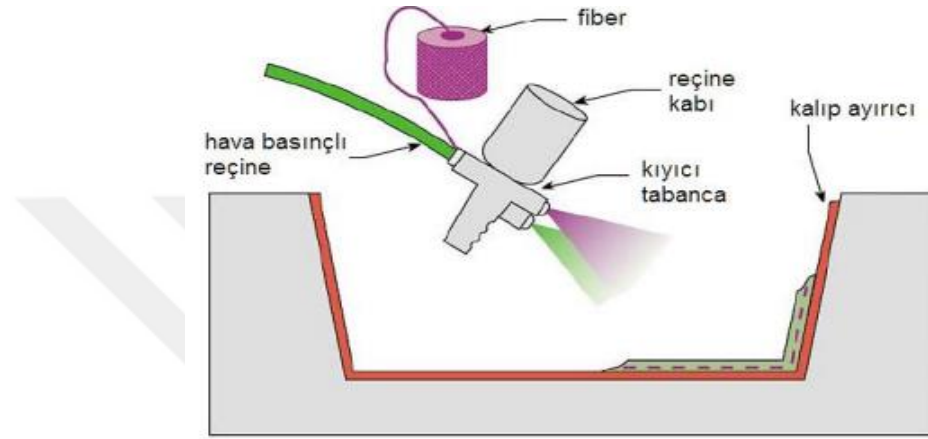


Şekil 1.6. El sarma yöntemi (Gülmez, 2018)

1.1.3.3. Püskürtme Yöntemi

Püskürtme yöntemi, yukarıda bahsetmiş olduğumuz el yatırma yönteminin biraz daha gelişmiş hali olarak tanımlayabiliriz. Jelkot ile işlem görmüş kalıbın yüzeyine

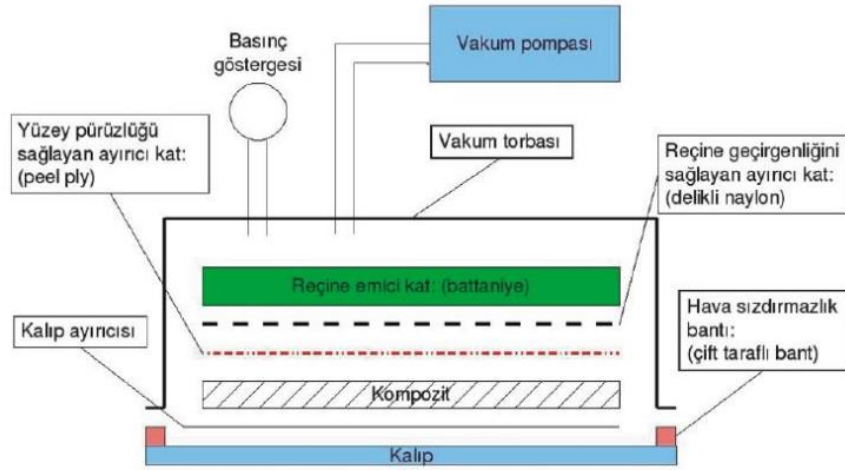
yatırılan elyaflar, özel bir tabanca yardımıyla reçinenin elyaflar arasına nüfus etmesi sağlanır. Daha sonra yine tabanca üzerinde bulunan ve kendiliğinden hareket eden kırpıcı ile elyafların kırılma işlemi yapılır ve oda sıcaklığında elyafların kuruması sağlanır. Tüm işlemlerden sonra silindirik bir rulo yardımıyla elyafların yüzeyi düzeltilerek ürünlerin hazırlanması tamamlanmış olur. Matris görevini çoğunlukla polyesterler, takviye görevini ise lifler yapmaktadır. Bu yöntemle üretilmiş ürünlerin mekanik özellikleri, kıyılmış elyaflardan üretildiği için daha düşüktür.



Şekil 1.7. Püskürtme yöntemi (Karol & Ürkmez Taşkın, 2019)

1.1.3.4. Vakum torbası Yöntemi

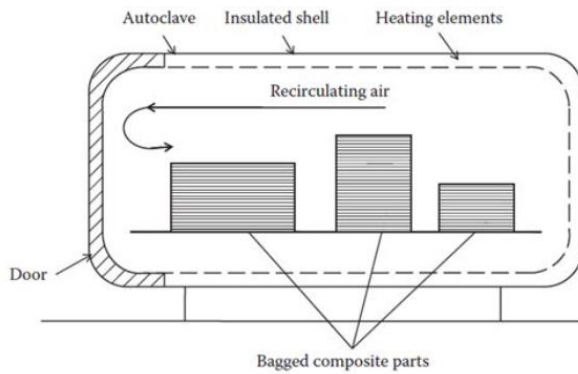
Bu yöntem de püskürtme yöntemi gibi el yatırma yöntemine benzeyen bir diğer üretim yöntemidir. El yatırma işlemi tamamlandıktan sonra reçine ile nüfus eden tabakalı elyaflar vakum torbası içerisine alınır. Vakumlama tamamlandıktan sonra, eldeki malzeme hazırlanmış halde bulunan fırında pişirilmeye bırakılır ve işlem sonrasında ürün hazır hale gelmiş olur. Bu yöntem daha büyük ve daha kompleks olan malzemelerin üretimi için uygundur. Ayrıca vakum torbasının yapmış olduğu işlem neticesinde reçineler, elyafların arasına daha iyi şekilde uygulanır. Ayrıca bu yöntem el yatırmaya göre boşlukların ve hava kabarcıklarının daha az olduğu, karbon elyaf oranında ise daha yüksek katsayılar görüldüğü belirlenmiştir.



Şekil 1.8. Vakum torbası yöntemi (Durgun & Vatansver, 2013)

1.1.3.5. Otoklav Yöntemi

Polimer yapıları kompozitlerin özelliklerini arttırmak için öncelikle elyaflar içerisine nüfus eden reçine miktarını azaltmak ve üretim aşamasında malzemeler arasındaki hava boşluklarını tamamen ortadan kaldırmak gerekmektedir. Bunun en kolay yolu yüksek sıcaklık ve basınç altında malzeme üretimi yapmaktır. Vakum torbolama yöntemi buna verilebilecek en iyi üretim yöntemlerinden biri olmasına rağmen, daha sağlıklı sonuçlar alınması için otoklav yöntemi tercih edilmektedir. Bu yöntem, 1 atm basınçtan daha fazlasının uygulanabilmesini sağlamayı, karmaşık olan malzeme üretimlerinde daha sağlıklı sonuçları almayı amaçlamaktadır. Vakum torbalama yöntemine ek olarak basıncı, ısıyı ve emişi daha iyi kontrol edebilen bir otoklav adı verilen malzeme kullanılmaktadır. Ancak yöntemin diğerlerine göre maliyetleri yüksek ve uygulama süreleri daha uzundur.



Şekil 1.9. Otoklav yöntemi (Strong, 2008)

1.1.4. Elyaf Takviyeli Kompozitler

Lifler; tekstil uygulamalarında belirli bir uzunluğa, mukavemete ve inceliğe sahip olan, esnemeye ve bükülmeye müsait olan doğal veya yapay olan her türlü malzemedir. Teknolojik gelişmeler lif takviyeli kompozit malzemelerde üretim maliyetlerinde belirli bir düşüşe, verimliliğinde gözle görülür bir artışa, emniyet ve güvenlik aşamalarında ise önemli yol katetmesine sebep olmuştur. Ayrıca malzemeye kolay şekil verilebiliyor olması tasarımcıları kesme ve şekil verme gibi zorluklardan kurtarmıştır. Elyaf lar ise; birden çok lifin bir araya gelerek oluşturduğu topluluğun adıdır. Kısacası liflerin çoğullaştırılmış hali, yani liflerin kasılabilmesi, kopma mukavemeti ile eğrilebilmesi, birbirlerine yapışabilmesi ve enleri boylarına göre çok kısa olabilmesi açısından renkli veya renksiz lifler topluluğudur. Elyaf takviyeli kompozitler, ince yapılı elyafların matrislerin yapısında görevlendirilmesiyle meydana gelmiştir. Elyaf lar kompozit malzemeler içinde en yaygın olarak kullanılan takviye çeşitidir. Elyaf takviyeli kompozitler, uzun lifler, dokuma kumaş, kısa kesilmiş lifler gibi değişik formlarda olabilirler. Her biçim ayrı özelliklerle sonuçlanır. Elyaf yapıların matrisler içerisine yerleşimleri, kompozit malzemenin mukavemetini ve rijitliğini etkileyen önemli bir değişkendir. Örneğin, karbon elyafların çekme mukavemeti 50 kat, rijitliği ise 3 kat artmıştır. Bunun yanı sıra elyafların uzunluk/çap oranı arttıkça elyaflara gelen yük miktarı da aynı oranda artar. Kompozit malzemenin mukavemetini etkileyen bir diğer değişken ise elyaflarla matrisler arasındaki bağların yapısıdır. Matris malzemenin yapısında boşluklar varsa elyaflarla olan temas azalacaktır.

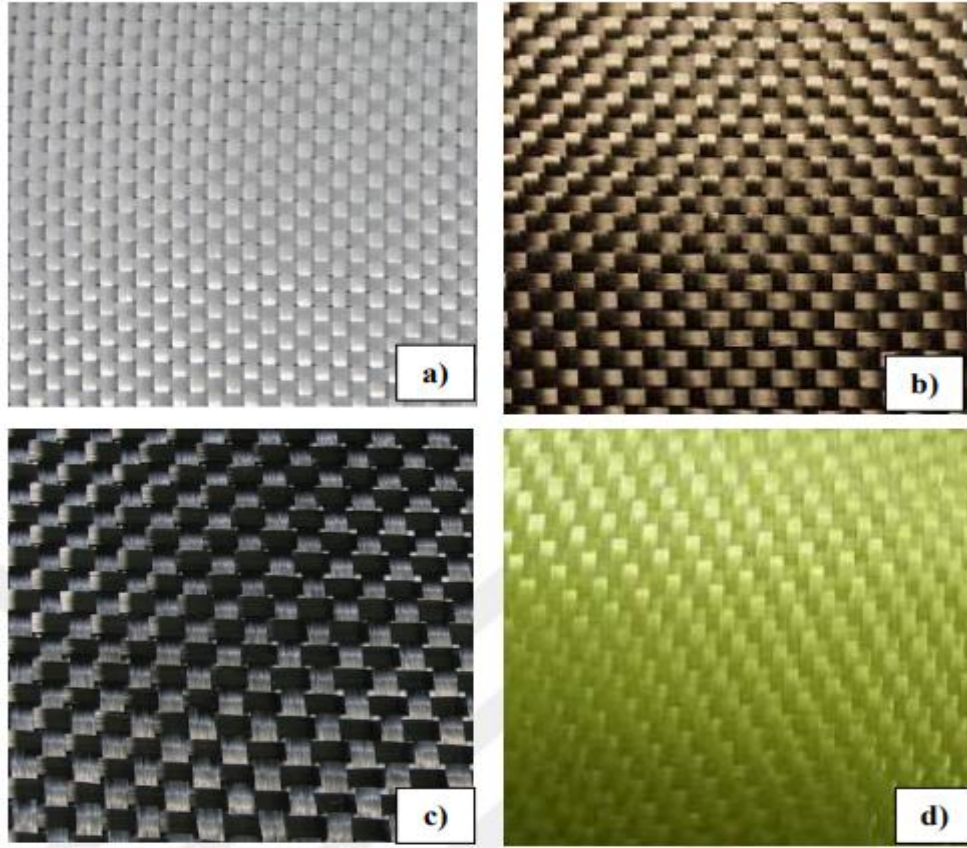
Elyaf takviyeli matris kompozitler; ağırlığının düşük olması, biyolojik özelliklerini kaybetmesi (Thakur ve ark., 2014), mukavemetinin yüksek olması (Ku ve ark., 2011; Barari ve ark., 2016), sertliğinin yüksek olması (Unterweger ve ark., 2014), korozyon dayanımının iyi olması ve sürtünme katsayısının düşük olması (Pei ve ark., 2015), elyaf kompozitlerin mekanik özelliklerin ve tribolojik performansın önemli olduğu projelerde kullanılmasında önemli rol oynamaktadır.

Elyaf takviyeli kompozitler doğal elyaflar ve sentetik (üretim) elyaflar olarak sınıflandırılırlar. Doğal elyaf takviyeli kompozitler hayvansal, bitkisel ve minarel kaynaklı lifler olarak 3 gruba ayrılır. Hayvansal lifler (yün, kaşmir, deve tüyü, doğal ipek) kimyasal olarak proteinlerin yapılarında bulduklarından dolayı protein elyaf olarak da bilinirler. Bitkisel lifler (pamuk, keten, kenevir, kendir) yapılarında %60 - %90 arasında selülöz maddesi içerdiklerinden dolayı selülozik elyaf olarak da bilinirler. Sentetik elyaf takviyeli kompozitler organik ve inorganik olarak 2 sınıfta değerlendirilir.

Organik olanları aromatik, aramid, polietilen, kevlar, polyester vb. olabilir. İnorganik olanları cam, bazalt, metal, karbon, bor vb. olabilir (Namvar ve ark., 2014). Doğal elyaf takviyeli kompozitler çoğunlukla düşük mekanik özellikler gösterirler. Buna rağmen verimi ve spesifik yüzey alanı yüksek olan elyafları üretmek daha kolaydır. Doğal elyaflar kimyasal sürece girdikleri zaman sentetik elyaflarla rekabet edebilme özelliğine de sahip olur (Ghalia ve Abdelrasoul, 2019).

Elyaf takviyeli kompozitler diğer kompozitlere göre biraz daha az karmaşık görünür. Polimer yapılı kompozitler tek olduklarında viskoelastik davranışa sahiptir. Ancak elyaf takviye edildiği zaman bu polimer yapılı kompozitler elastik özelliklere sahip olmaktadır. Aynı zamanda da ortamdaki sıcaklıktan ve yüklerin etkileşim süresindeki değişimlerden daha az etkilendiği tespit edilmiştir (Hollaway ve Head, 2000).

Elyaf takviyeli polimer kompozitlerin takviye malzemesi olarak kullanılan yapısal uygulamalar için en önemli olanları cam, karbon ve aramid elyafıdır. Cam elyafların ara yüzey yapışmaları ve mukavemet özellikleri oldukça yüksektir. Üretim maliyetleri en pahalı olan tür ise karbon elyaflardır. Karbon elyaflar matrislerle aralarında iyi bir yapışma özellikleri göstermezler. Karbon elyafların mukavemetleri de oldukça iyidir. Aramid elyaflar ise maliyet olarak karbon elyafların düşük dereceli olanlarıyla aynıdır. Matris malzemesi olarak en çok kullanılan türü ise plastik reçinelerdir. Bunların içinden de maliyeti düşük olması sebebiyle polyester reçine ilk sırayı almaktadır.



Şekil 1.10. Bazı elyaf takviyeli polimer kompozitler; a) Cam elyaf, b) bazalt elyaf, c) karbon elyaf, d) aramid (kevlar) elyaf (Şükür, 2019)

Aşağıda farklı elyaf çeşitlerinin bazı fiziksel, termal ve mekanik özellikleri verilmiştir. Karbon ve aramid elyaflar tabloda görüldüğü üzere diğer elyaf çeşitlerine göre daha iyi özelliklere sahiptir. Yoğunluk olarak aralarından en yüksek olanlarıdır. Ayrıca bu elyaflar erimedikleri için diğerlerinden ayrı tutulurlar. Bu yüzden yüksek sıcaklık direncine sahiptirler. Karbon elyaflar oksijenden muhafaza edildiği takdirde 2500 °C sıcaklık üstünde bile üstün özelliklerini koruyabilirler. Bu sayede makinaların yüksek sıcaklıklarda çalışmalarına imkan sağlayarak makinanın ömrünü uzatırlar. Karbon elyaflar aynı zamanda elastisite modülü en yüksek olanıdır. Aynı zamanda bazalt, cam ve aramid elyaflara göre daha yüksek çekme mukavemetine sahiptir. Aramid elyaflar ise yine karbon elyaflara özellikleri bakımından en yakın olan elyaf çeşitidir.

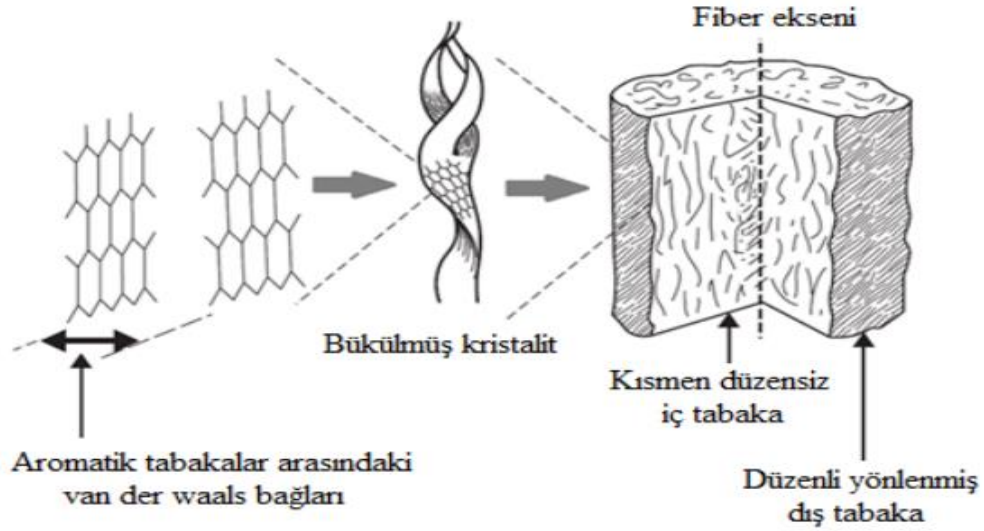
Çizelge 1.4. Matrisler için kullanılan termoset reçinelerin çeşitleri ve temel özellikleri (Sukur E. F., 2019)

Özellikler	Karbon elyaf	Aramid elyaf	Cam elyaf (E-camı)	Cam elyaf (S-camı)	Bazalt elyaf
Yoğunluk (g/cm ³)	1.4	1.3	2.5	2.5	2.6
Fiber çapı (µm)	5-9	5-9	9-15	9-15	9-15
Çekme mukavemeti (MPa)	4000-6500	2900-3450	1200-1500	2020-4650	3000-4840
Elastisite modülü (GPa)	230-240	70-140	70	83-86	79.3-93.1
Kopma uzaması (%)	1.4-1.8	2.5-3.1	3.5	3.9	3.1
Özgül ağırlık	1.75-1.95	1.44	2.5-2.62	2.46	2.65-2.8
Sıcaklık dayanımı (°C)	-50....+700	+205	-50....+380	-50....+300	-260....+700
Maks. uygulama sıcaklığı (°C)	400	250	380	500	700-720
Erime sıcaklığı (°C)	Erimez	Erimez	1120	1550	1450
Termal iletkenlik (W/m K) (+25/-5)	-	0.04	0.034-0.04	0.034-0.04	0.031-0.038

1.2. Karbon-Aramid Elyaf Takviyeli Polimer Kompozit Malzemeler

1.2.1. Karbon Elyaf Takviyeli Polimerler

Karbon elyaflar, en az %92 oranında karbon elementini barındıran, yüksek mekanik, kimyasal, biyolojik ve termal özellikleri ile Watt, Johnson ve Phillips tarafından ilk defa 1960'larda İngiltere'de üretilerek temelleri atılmıştır. Bu üretilen elyaflar yapısal olarak ilk defa nanoyapılı olma özelliği ile tasarlanarak yapılarında elyaf eksenine paralel olan karbon şeritlerden meydana getirilmiştir (Şekil 1.11). Şekilde de görüldüğü üzere şeritlerin bazıları düzensiz bir şekilde konumlanırken, bazıları da elyaf eksenine paralel olarak uzanırlar. Paralel olan bu şeritler karmaşık olarak birbirleriyle etkileşim halindedir. Karbon elyafların boyutları, elyafların mekanik özelliklerini etkileyen onlarca ve yüzlerce nanometre aralığındadır. Bu mekanik özellikler, şeritlerin ve elyafların yapısındaki kıvrımların arasında oluşan güçlü bağlardan dolayı çoğu malzemeden üstündür (Hull ve Clyne, 1981).



Şekil 1.11. Karbon elyafların yapısı (Warren, 2011)

Karbon elyafların en önemli özellikleri arasında düşük yoğunluk ve yüksek mekanik özellikler göstermektedir. Bu özelliklerden dolayı yüksek mukavemet gerektiren uygulamalarda sıklıkla tercih edilirler. Karbon elyafların yapısı, çelikten 4,5 kat daha hafif olmasına rağmen 3 kat daha dayanıklıdır. Bunların yanısıra termal ve elektriksel iletkenliklerine de sahiptirler. Böylelikle polimer, seramik ve karbon matrislerin yapısına rahatlıkla girerek daha iyi özelliklere sahip çeşitli kompozit malzemelerin üretilmesine olanak sağlamaktadırlar.

Karbon elyaflar, çeşitli kullanım alanlarına sahip olduklarından dolayı kendisine duyulan talep artmış, dolayısıyla üretimi günden güne artış göstermektedir. Uluslararası gazetelerin haberlerine göre 2014 yılında karbon elyaf üretimi 8 ülke (Japonya, Amerika, Almanya, İran, Fransa, İngiltere, Macaristan ve Tayvan) ile 130 bin ton olarak açıklanmıştır. Bunun yanısıra karbon elyafı dünya üzerinde üretebilecek teknolojiye sahip sadece 2 firma vardır, bunlarda Amerika ve Japonya menşelidir. Ayrıca karbon elyaf üretimi 2020 yılında 185 bin ton bandı çevresinde olması beklenmektedir (Roberts T., 2020). Karbon elyafların üretimine ülkemiz Türkiye’de de başlanmıştır. Aşağıda verilen resimde Yalova’da konumlanmış olan bir üretim tesisine ait karbon elyaf parçaları verilmiştir (Şekil 1.12).



Şekil 1.12. Karbon elyaf parçaları (Uzanalioğlu H., 2021)

Karbon elyafların maliyetlerindeki beklentiler, bu kadar talebe rağmen beklenen oranda herhangi bir düşüşle karşılaşmamaktadır. Bunun en temel sebebi ise hammadde fiyatlarının aşırı yüksek olmasıdır. Bundan dolayı maliyet hesabının daha az önemli olduğu uygulamalarda, havacılıktan inşaat sektörüne, otomotivden tekstil sektörüne, formula 1 araçlarında, basınç tanklarında, rüzgar türbinlerinde ve daha birçok alanda kullanım alanına sahip olmuşlardır. Özellikle havacılıktaki verimliliği artırması ve karbon emisyonundaki azalmadan dolayı Boeing 787 ve Airbus A350'nin üretiminde ağırlık kazanımının yaklaşık %50'ye kadar çıkmasını sağlamıştır (Villareal ve ark., 2014).

Karbon elyafların kimyasal yapısını, %90 'dan fazlasını karbon (C) ve geri kalan %10 'luk kısmını ise azot (N), oksijen (O) ve hidrojen (H) elementleri oluşturmaktadır. Bu yapılar ortamdaki oksidasyonun şartlarına, sıcaklığına ve zamanına bağlı olarak değişiklikler göstermektedir. Karbon elyafların yukarıdaki şartlarına bağlı olarak 2 tür içinde sınıflandırabiliriz. Birincisi sürekli elyaflardır ki, bu sınıf reçinelerin matris olarak kullanılabilirdiği örgülerde, dokumalarda, tellerde, urganlarda, bobin uygulamalarında ve prepreglerde daha çok tercih edilmektedir. İkinci sınıf olan kırılmış elyaflar ise, enjeksiyon modelleme, basınçlı modelleme yöntemiyle üretilmiş olan makina parçalarında ve valf üretiminde daha çok kullanılmaktadır.

Karbon elyaflar genelde 3 malzemeden elde edilmektedir.

- PAN (poliakrilonitril)
- Selülöz (Rayon)
- Zift

PAN bazlı elyaflar diğerlerine göre daha yüksek çekme mukavemetine sahiptir. Bu değer 2413-3102 MPa aralığında, ziftlerin ise 2069 Mpa olarak bilinmektedir. Ziftler

PAN'lara göre daha düşük mekanik özelliklere sahip oldukları için çok tercih edilmezler. Ancak maliyetleri diğerlerine göre en düşük olanıdır. Rayonlar ise günümüzde elastik modülü düşük olan elyaflarda kullanılmaktadır. Maliyetleri çok yüksek oldukları için tercih edilmezler. PAN bazlı elyaf çeşitleri tüm özellikler kıyaslandığında en çok kullanılan malzemedir. Bu yüzden üzerinde sürekli geliştirme çalışmaları yapılmaktadır (Şahin, Y., 2000). PAN bazlı karbon elyafların içerisinde %93-95 oranlarında karbon (C) elementi bulunurken, bu oran grafitlerde ise %99 'a kadar çıkmaktadır. Bunun en temel nedeni üretim esnasında uygulanan yöntemlerdir. Bunların yanısıra karbon (C) 1300 °C'de üretilirken grafitler 2000 °C'nin üzerinde üretilmektedir.

Endüstriyel tasarımda PAN bazlı karbon elyafların üretimi 3 aşamadan oluşmaktadır (Karol & Ürkmez, 2019).

1. Oksitlenme Aşaması :

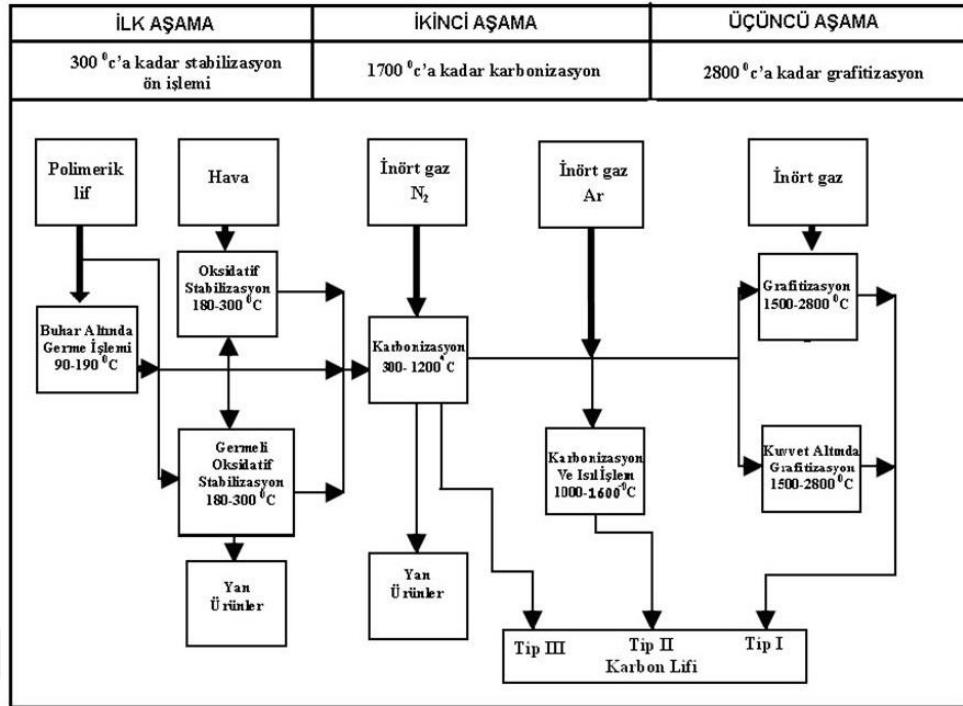
Bu aşamada elyafların hava ortamında 300 °C'ye kadar ısıtılmasıyla buhar ortamında germe işlemi yapıldıktan sonra çapraz bağlar oluşmaya başlar, yapısında bulunan H, N ve CO atomlarının dışarıya atılması sağlanır ve bunların yerine uçuculuğu daha fazla olan O atomlarının eklenmesi yapılır.

2. Karbonlama Aşaması :

Bu aşamada ürünler öncelikle 1200 °C'ye kadar ısıtılma işleminden sonra halkalarda yer alan N₂ gazlarının ayrışmasıyla ilk tip ürünler ortaya çıkmış olur. Daha sonra 1700 °C'de aynı işlem Ar gazları için yapılır ve ikinci tip ürünler meydana gelir.

3. Grafitleme Aşaması :

Son olarak ürünlerin 2800 °C de artık tüm gazların ayrıştırılması yapılmış ve lifler tamamen karbonlaşmış halde üçüncü tip ürünlerin oluşumu sağlanır. Tüm bu işlemler bittikten sonra elyafların, reçine matrislerle daha iyi yapışabilmesi için öncelikle yüzeyleri iyice temizlenir ve elektrolit banyoya yatırılır. Temizlenen elyafların korunması için epoksi reçinelerle kaplanması, matrislerle aralarında yeni bir ara yüzey oluşturmak için yapılmaktadır (Demirel, 2007).



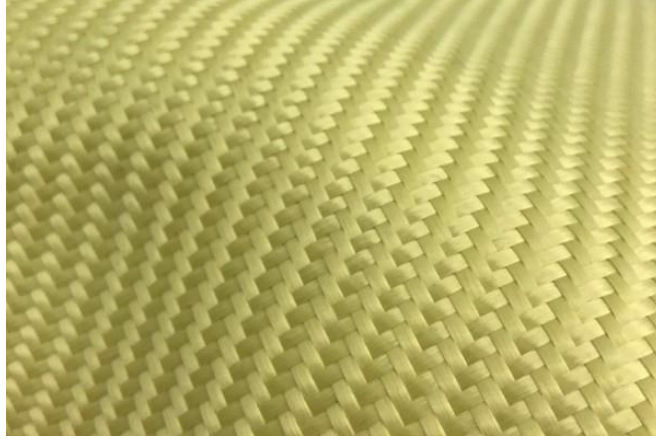
Şekil 1.13. PAN bazlı elyaf ile karbon elyaf üretimi (Yaman, 2006)

1.2.2. Aramid (Kevlar) Elyaf Takviyeli Polimerler

Aramidin kimyasal yapısı, amid (-CO-NH-) liflerinin en az %85 'nin doğrudan iki aromatik halka arasında bağlanmış olarak bulunan sentetik poliamid yapıdadır. Aramid elyaflar aynı zamanda aromatik polyamid olarak da adlandırılmaktadır. Aramid elyaflar da tıpkı karbonlar gibi yoğunlukları düşük fakat çekme mukavemeti-ağırlık oranları çok yüksek olan elyaf çeşitidir. İlk defa DuPont firması tarafından 1960'lı yıllarda geliştirilerek başta HT-1, daha sonra Nomex adıyla patenti alınmış olup, 1973 ise Kevlar ismi ile piyasaya sürülmüştür. Daha sonra teknolojinin gelişmesi ve kompozite duyulan ilginin artmasıyla beraber uzay, deniz, inşaat alanında fazlaca tercih edilmeye başlanmıştır. Tıpkı karbon elyaflarda olduğu gibi negatif termal uzama katsayısına sahiptirler. Düşük termal uzamalı panellerin imalatında kullanımları uygundur. Aynı zamanda polimerleri güçlendirmek için yapılan çalışmalarda da kullanılmaktadır (Bank, 2006).

Aramid elyaflar sarı renkli (Şekil 1.14) ve bu elyafları oluşturan liflerin yapısı da anizotropiktir. Bu lifler ısıya ve kesilmelere karşı da dayanıklı sentetik yapılardır. 400 °C ye kadar üstün mekanik özelliklerini korurlar, dinamik yorulmalara karşı dirençlidirler ve elastik yapıya sahiptirler. Organik olan çözücülerde dayanıklı, ultraviyole ışın, tuz, klor ve asitlere karşı ise duyarlıdırlar. Yapısı itibari ile nem almaya

yatkındırlar. Uzay araştırmalarında, kurşun geçirmez giysilerde ve balistik bileşimlerinde, aynı zamanda tekerlek üzerinde asbest yerine de kullanılmaktadırlar.



şekil 1.14. Aramid elyaflar (şükür, 2019)

Kevlar elyafların en çok bilinen türleri aşağıda sıralanmıştır.

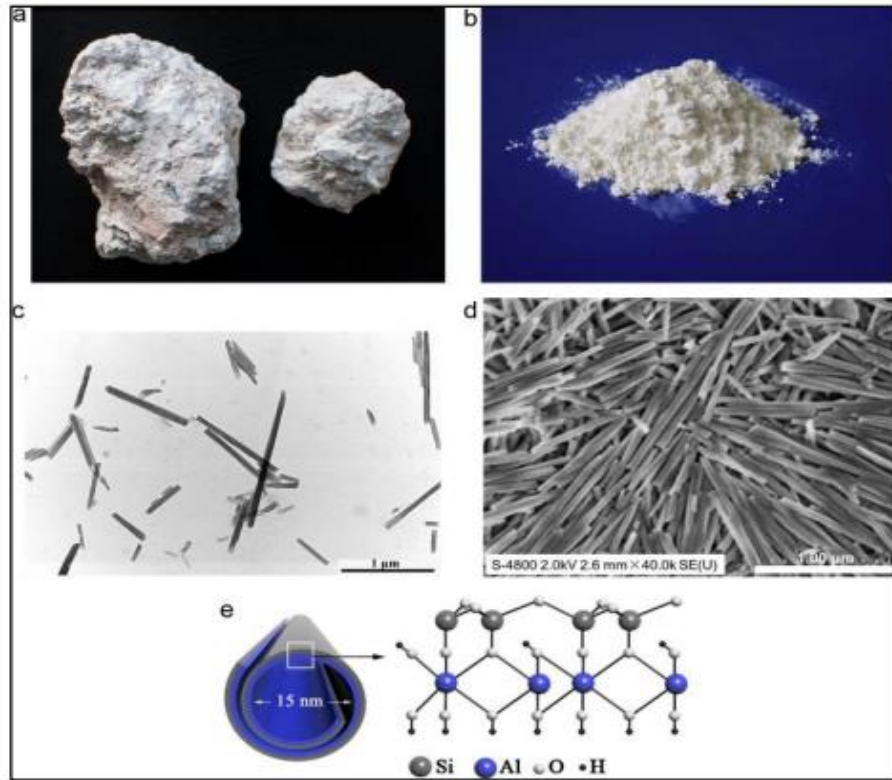
- Kevlar,
- Kevlar 29,
- Kevlar 49,
- Kevlar 68,
- Kevlar 149 ‘dur.

Sırasıyla kullanıldıkları yerleri örnekleyecek olursak; Kevlar, daha çok araç veya uçakların tekerleklerinde takviye elemanı olarak, Kevlar 29, kablolarda, balistik korunma amaçlı imal edilen kumaşlarda, organlarda ve kaplanmış kumaşlarda, Kevlar 49, otomotiv sektöründe, deniz sektöründe ve sportif amaçlı eşyaların yapımında, Kevlar 68, aynı kevlar 49 elyafının kullanıldığı her yerde kullanılmaktadır. Kevlar 149 ise Kevlar 49’a göre daha yüksek modüle sahip olmasına rağmen üretimi durdurulmuştur. Ayrıca Kevlar 29 hepsinin arasından en düşük modüle, aynı zamanda en yüksek tokluğa sahip olan kevlar çeşitidir. Kevlar 49 ise darbelere ve diğer yüklere karşı çok iyi hasar toleranslarına sahiptir. Erimezler veya yanmazlar fakat 427 C sıcaklığın üzerinde yapılarında bozulmalar meydana gelir. Titreşimleri çok iyi snmlerler. Kompozit malzemelerin yapılarında da takviye edici lif olarak kullanılmaktadır.

1.3. Halloysit Nanotüp (HNT)

Bu yapıların temelleri 1826 senesine, Berthier'in çalışmalarına kadar uzanmaktadır. Ancak en önemli çalışma Churchman'ın 2000 yılında yapmış olduğu, toprakların ve kaya parçalarının içerisinde bulmuş olduğu halloysit kil tabakalardır. Bu çalışmanın ardından çalışmalarına devam eden Churchman magmatik olan veya olmayan kaya parçalarında bu kile ratlanabileceğini savunmuştur (Rosas-Aburto ve ark. 2015).

Halloysitler, alümiyum minerallerinin oktahedral yapıda ve silisyum minerallerin ise tetrahedral yapıda bire bir oranda stokiyometrik olarak etkileşimleri sonucunda oluşmuş, $Al_2[Si_2O_5(OH)_4].2H_2O$ formülüyle gösterilen kaolin grubundan kil mineralidir. Birçok farklı endüstriyel alanlarda kullanımları mevcuttur. Halloysitlerin doğadaki tortul kayalardan elde edilmesi mümkündür ve genellikle beyaz renge ortaya çıkmaktadırlar. Aşağıda işlem görmemiş kilin, toz halinde bulunan kilin, TEM, SEM ve halloysit kiline ait kristal yapı görüntüleri verilmiştir (Liu ve ark., 2014).



Şekil 1.15. (a) işlem görmemiş kil, (b) toz halindeki kil, (c) TEM görüntüsü, (d) SEM görüntüsü, (e) Halloysitin kristal yapısı (Liu ve ark., 2014)

Halloysitler, yapısal ve kimyasal yönden kaolinit ve dicit minerallerine benzemektedirler. Kaolinitler üst üste dizilmiş plakalar gibi görünmektedir. Halloysitler

ise içi boş silindirik bir yapıya sahiptir. Ayrıca yüksek en/boy oranlarına sahip, çok katmanlı inorganik nanotüplerdir. Bu özellikleri sayesinde matrislerle nanotüpler arasındaki yük transferinin kontrolünü sağlayarak polimerlerin mukavemetlerindeki artışa yardımcı olurlar. Bu sayede daha fazla potansiyel kullanım alanlarına sahip olmaktadır. Boyları 0,2-2 μm aralığında, yapılarındaki tüplerin çapları ise 10-40 nm ve 40-70 nm aralığında olmaktadır. Yüzeyleri pozitif (+) ve negatif (-) yüklerle yüklenir. Halloysitler tek tabakalı su molekülleriyle birim katmanlarına kadar ayrılırlar. Bu şekilde kullanılan türüne “Halloysit $-(10 \text{ \AA})$ ” denir. Bir diğer türü ise yapısında su bulundurmayan “Halloysit $-(7 \text{ \AA})$ ” türüdür.

Çizelge 1.5. HNT’lerin yapısal özellikleri (Çetiner, 2019)

Özellik	Aralık
Uzunluk	0,2-2 μm
Dış Çap	40-70 nm
İç Çap	10-40 nm
En/Boy Oranı	10-50
Elastisite Modülü	140 Gpa
Sulu çözeltisindeki ortalama partikül boyutu	143 nm
Sulu çözeltisindeki partikül boyutu aralığı	50-400 nm
BET yüzey alanı	22,1–81,6 m^2/g
Gözenek boşluğu	% 14–46,8
Lumen boşluğu	% 11-39
Yoğunluk	2,14 – 2,59 g/cm^3
Ortalama gözenek boyutu	79,7–100,2 \AA
Yapısal suyun bırakılma sıcaklığı	400-600 $^{\circ}\text{C}$

Halloysit nanotüpler doğada kolaylıkla bulunabildiği için üretim maliyetleri çok daha ucuz olup aynı zamanda biyoyumlu yapısıyla ön plana çıkmaktadır. Polimerlerin çoğunluğu yapılarında polar grup bulundurmadığı ve matrisler ile dolgu yüzeyleri arasındaki bağlar zayıf olduğu için halloysitlerle etkileşimleri zayıftır. Bu durum halloysitlerin avantajlarının bir hayli azalmasına neden olur. Tüm bu olumsuzluklara rağmen halloysit killeri birçok insanın dikkatini çekmeyi başarmış ve akabinde de halloysit katkılı termoplastikler üzerinde çalışmalar yapılmıştır (Kubade ve Kshirsagar, 2015).

Halloysit nanotüpler, porselen çeşitlerinin üretiminde, diş alanında dolgu malzemesi olarak, seramik malzemelerin üretiminde hammadde olarak, katalizör görevinde, kirliliği iyileştirmede ve nano taşıyıcı olarak kullanılmaktadır. Son dönemlerde, kanser hücrelerinin yok edilmesinde, implant üretiminde kullanımları yaygınlaşmıştır (Liu ve ark., 2014).

1.4. Nanokompozit Malzemeler

Nanokompozitler üzerindeki ilk çalışmalar 1950'li yılların sonlarında Richard P. Feynman tarafından yapılmıştır. Bu teknolojinin lideri olarak bilinen Feynman yaptığı çalışmalarda, kullanılan malzemelerin ve aletlerin moleküler boyutlarda üretilebileceğini konu edinmiş ve bu çalışmasının nanokompozit alanında milat olarak kabul edilmesini sağlamıştır. Nano yapılar malzemelerdeki en/boy oranını büyütürken yüzey alanındaki etkiyi arttırmayı amaçlamaktadır (Salamanca-Buentello ve ark., 2005).

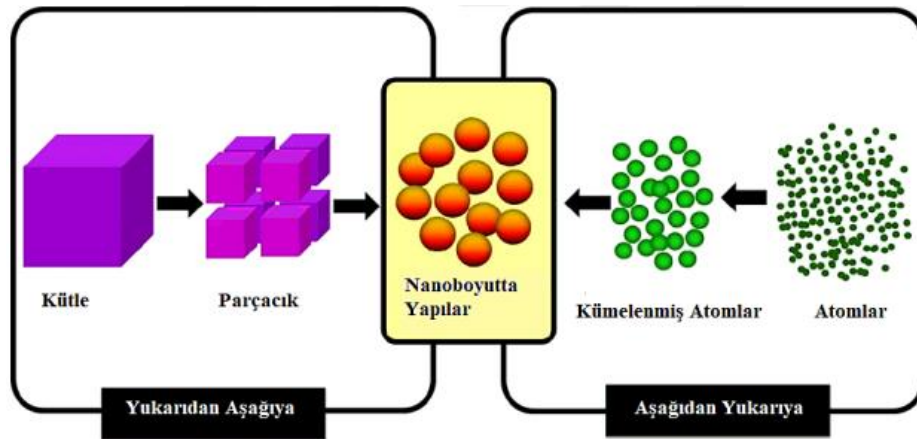
Nanolifler, özel uygulamalar için kullanılan malzemelerin nano ve mikro yapıda olmalarından dolayı son yıllarda sıkça tercih edilmektedir. Çapları 100 nanometreden küçük olan liflerden oluşmaktadırlar. Bu yapıların, daha fazla gözeneklere sahip olmasından, özgül ağırlıklarının düşük olmasından, yüzey alanlarının daha fazla olmasından ve yumuşak olmalarından dolayı kullanım alanları oldukça geniştir. Ayrıca yapılarındaki matrisler ile nanoparçacıklar arasındaki fazların etkileşiminden dolayı yükseltilmiş mukavemet, sıcaklığa ve çözücülere karşı dirençli ve oldukça yüksek bariyer özelliklerine sahiptirler (Lagashetty ve Venkataraman, 2005). Nanoliflerin günümüzde elektronik, biyoloji, tıp, sensör, biyomedikal, doku mühendisliği, seramik gibi alanlarda kullanımları yaygın olup son zamanlarda gıda ve tarım endüstrisinde de kullanılmaya başlanmıştır (Loh XJ ve ark., 2010).

Nano yapılarda partiküllerin kritik seviyelerden daha küçük olmasına 'kritik boyut' adı verilir. Bu durum partiküller arasında etkileşimlerin değişmesine neden olur. Bu bağlamda partiküller kritik seviyelere yaklaştıkça iyileşmeler görülmektedir (Camargo ve ark., 2009).

Çizelge 1.6. Nanokompozit sistemlerde çeşitli özelliklerde değişikliklerin beklenebileceği partiküllerin kritik noktaları (Camargo ve ark., 2009)

Özellikler	Değişikliklerin beklenebileceği boyut (nm)
Katalitik aktivite	<5
Sert malzemelerin yumuşak hale getirilmesi	<20
Kırılma indisi değişikliği	<50
Süper paramanyetizma ve diğer elektromanyetik olaylar	<100
Mukavemet kazandırma ve toklaştırma	<100
Sertlik ve plastisitenin değiştirilmesi	<100

Matrisler ile arayüzeylerin etkileşimlerinin yanında nano yapının şekli ve özellikleri de nanokompozitin özelliklerini etkilemektedir. Nano yapının en/boy oranı, matrislerin yapılandırılmasında, kompozitlerin elektriksel, optik, mekanik, elektrokimyasal ve ısı özelliklerinin daha iyi sonuçlar vermesi için önemli bir etkidir. Literatürdeki araştırmamız sonucunda en/boy oranlarının yüksek olduğu kil, karbon nanotüp ve nano elyaf takviye elemanlarının polimer matrisler içerisindeki dispersiyonlarının kompozitlerin özelliklerini daha düşük oranda bile etkiledikleri belirtilmiştir (Puggal ve ark., 2016).



Şekil 1.16. Nanopartikül üretim yöntemleri (Turp, 2019)

Nano boyutta partikül üretimi için 2 temel yaklaşım öngörülmektedir (Şekil 1.16).

Top-down (yukarı-aşağı) yöntemi, nanokompozit bünyesindeki çoğul ve büyük mekanizmaları ve yapıları daha düşük ölçeklerde küçültülerek nano boyutlarda yeni

malzemeler üreten yaklaşım türüdür. Bu yaklaşımda uygulanan yöntemlerden biri büyük enerji ile mekanik öğütme (bilyalı) olarak bilinen, en yaygın olarak kullanılan yöntemdir. Diğerleri elektro biriktirme ve litografidir. Zirkonyumdioksit veya katı seramikten imal edilmiş olan bilyalı mekanizmada, çelik veya tungsten karbürden imal edilmiş olan bilyalar ile mikro düzeydeki malzemeler boyutça daha küçük olan nano düzeye küçültülürler. Öğütme sırasında yüzeyde görev yapan aktifleştirici maddeler ile durağan bir yüzey alanı oluşturulmakta ve mekanik öğütme sürecine kimyasal ve fizikokimyasal olaylar da destek vermektedir (Sepeur, 2008).

Bottom-up (aşağı-yukarı) yöntemi, nanokompozitlerin yapısındaki organik ve inorganik yapıların atom-atom, molekül-molekül olarak tekrardan güncellenerek ortaya yeni, daha karmaşık yapıların çıkmasıyla tanımlanan yaklaşım türüdür (Subramani ve Ahmed, 2012). Bu yaklaşımdaki üretim şekli fizikokimyasal proseslere dayalıdır. Burada moleküller veya atomlar sıvı fazdan ve gaz fazdan nano partikül elde etme olarak iki şekilde üretilmektedir. Sıvı fazda olan moleküller sol-jel ve çöktürme olarak bilinen yöntemler ile üretilirken, gaz fazda olan moleküller kimyasal buhar yoğunlaştırma, asal gaz yoğunlaştırma, aerosol ve ultrasonik sprey piroliz (USP) yöntemleri ile üretilmektedir (Habiba ve ark., 2014).

1.5. Sürtünme

Belirli bir yüzey üzerinde hareket etmekte olan cisme göre ters yönde etki eden kuvvete “sürtünme kuvveti” denir. Sürtünme kuvveti cismin hareketini zorlaştıran, hareket eden cismin durmasını sağlayan, duran cismin hareket etmesini engelleyen ve aynı zamanda temas gerektiren bir kuvvettir. Sürtünme kuvvetini etkileyen etkenlerden birisi sürtünmenin gerçekleştiği yüzeyin cinsidir. Yüzeyin pürüzlülüğüne göre değişmezler. Yatay düzlem üzerinde uygulanan cismin ağırlığıyla doğru orantılı olarak değişir. Daima cismin hareket yönüne zıt yönde etki etmektedir. Kendi içerisinde kayma ve yuvarlanma sürtünmesi olarak ikiye ayrılırlar. Ayrıca uygulanan ortama bağlı olarak da sıvı ve kuru sürtünme olarak sınıflandırabiliriz.

1.5.1. Sürtünmeyi Etkileyen Faktörler

Sürtünme kuvvetini etkileyen bazı etkenler aşağıda verilmiştir.

- Etki ettiği cismin yüzey pürüzlülüğü (kare, daire)
- Uygulanan yüzeyin pürüzlülüğü (çakıllı yol, asfalt yol)
- Kayan cisimlerin üzerine uygulanan kuvvet (10 N, 30 N)

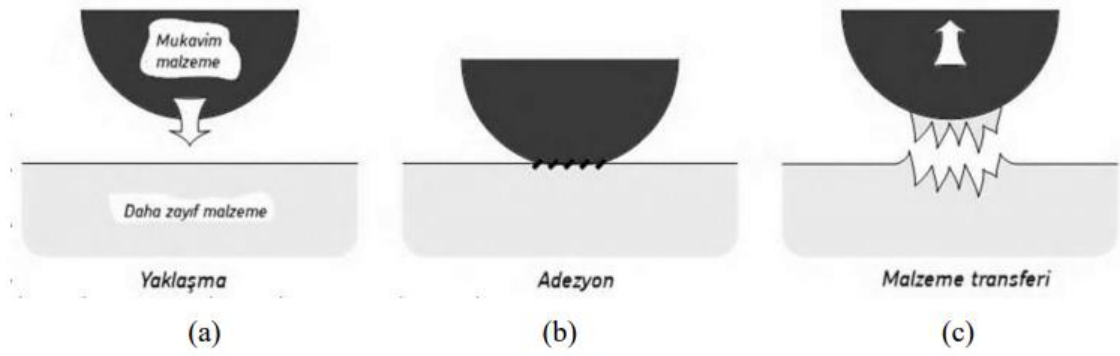
- Sürtünme katsayısı
- Uygulanan malzemenin morfolojisi
- Sıcaklık, yağmur, kar, yağlayıcı gibi dış koşullar

1.6. Aşınma

Mekanik kuvvetler altında iki farklı yüzey üzerindeki katı parçacıkların sürtünmeden dolayı koparak ayrılmasına aşınma denir. Bir başka deyişle aşınma, dış etmenlerin temas yüzeylerine etki etmesi sonucu yüzeyde oluşan fiziksel ve kimyasal yollarla gerçekleşen yıpranmalardır. Ancak mühendislik malzemelerinde her yıpranmaya aşınma diyemeyiz. Bir malzemenin aşınmış olması için ortada mekanik bir etken olması, gerçekleşen aşınmanın yavaş ve sürekli olması, cisim yüzeyinde değişim olması, izafi hareket yani ortada bir sürtünmenin olması lazımdır. Aşınma, malzemedan kaynaklanmakla beraber aynı zamanda sistemden de kaynaklanabilir. Makinelerde oluşan aşınmalar, kullanım ömürlerini etkilemektedir. Aşınmanın giderilmesi için birden fazla değişken olmalıdır. Bunlardan bazıları, aşınmanın sürekli olarak takip altında olması, yağlamaların eksiksiz yapılması, en doğru malzeme seçiminin yapılmasıdır. Aşınma üzerinde yapılan daha önceki çalışmalar göstermiştir ki birden fazla türe sahiptirler. Bunlar; adhezif, abrazif, korozif, yorulma, tabaka, yenme, erozyon, kavitasyon, püskürtme ve kimyasal aşınmadır. Yukarıda saymış olduğumuz aşınma türlerinden en çok görüleni adhezif ve abrazif aşınmadır. Abrazif aşınmanın boyutu normalden çok fazladır. Sert yapıya sahip, kütlesi çok hafif olan herhangi bir malzeme dahi abrazif aşınmaya neden olabilir. Ortaya çıkan basınç ve gerilme çok büyük olacağından bu kuvveti taşıyamayacak olan yüzeyler plastik deformasyona uğramak zorunda kalırlar.

1.6.1. Adhezif Aşınma

Daha çok kayma sırasında oluşan, iki farklı metalin birbirleriyle olan sürtünmenin sonucunda ortaya çıkan aşınma türüdür. İki metalin yüzeyleri birbirleri ile temas ettiklerinde aralarında adhezyon denilen bir çekim kuvveti oluşur. Bunun akabinde yüzeylerin pürüzlülüğü nedeniyle birbirleriyle etkileşime girerler. Bu aşınma türünde yüzeylerde bulunan sıvı, gaz veya oksit maddeler abrazif aşınmaya neden olabilirler. Yağlanmamış rulmanlarda, çelik hadde malzemelerinde, makas bıçaklarında sıkça görülmektedir (Demirsöz, 2018).



Şekil 1.17. Adhezif aşınma (Okka, 2019)

1.6.2. Abrazif Aşınma

Abrazif aşınma mekanizması, eşit veya daha büyük sertliğe sahip malzemenin yüzeyine bir başka katı malzemenin etki etmesi sonucu yüzeyde talaşları kaldırmasına, çizik oluşturmaya veya yüzeyi deforme etmesine denir. İş makinelerinde bulunan küreklerin kumu, çakılı, molozu alması abrazif aşınmaya örnek verilebilir. Abrazif aşınmanın olduğu yerde adhezif aşınma yoktur. Abrazif aşınma olmaması için yüzeylerin daha sert hale getirilmesi gerekmektedir (Kovaříková ve ark., 2009).

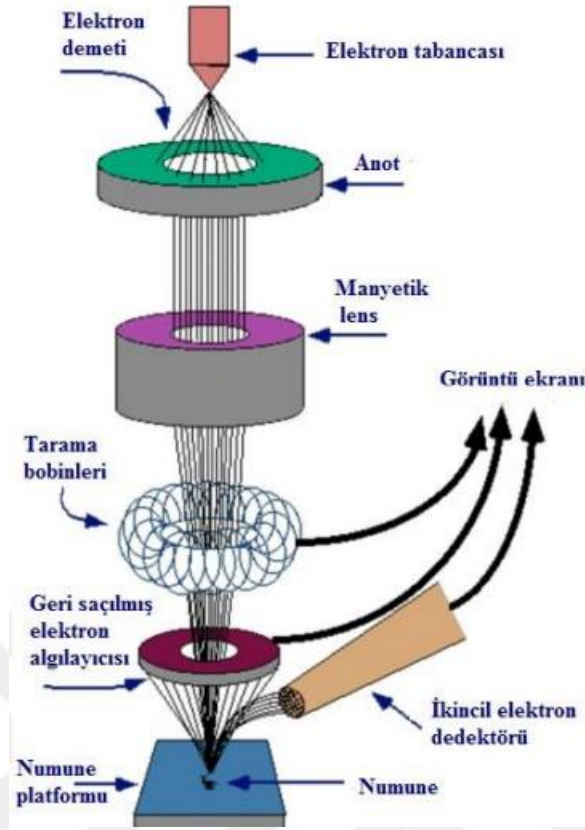
1.7. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)

SEM analizi yada SEM tekniği olarak bilinen taramalı elektron mikroskobu (SEM), dünya üzerinde birçok bilim alanında kullanılmaktadır. Bu yöntemle organik ve inorganik malzemeler, nanometreden mikrometreye kadar ölçeklendirilerek etkin bir şekilde analizleri yapılmaktadır. Bu ölçeklerde dahi çok hassas görüntüler üreterek, yüksek büyütme oranlarında (5x-300.000x arasında) çalışmaktadır. Analizler Şekil 1.18'de verilen ekipman üzerinde yapılmaktadır. Cihaz herhangi bir numuneyi tutabilme kabiliyetiyle birlikte değişken basınç sistemine sahiptir. Aynı zamanda 200 mm çapa ve 80 mm yüksekliğe kadar malzeme analizi yapabilmektedir. SEM cihazında metaller ve polimerlerin yanısıra çoğunlukla organik ve katı inorganik malzemelerin analizleri yapılmaktadır.



Şekil 1.18. SEM Quanta cihazı (Mohammed & Abdullah, 2018)

Seçilmiş olan numunelerin yüzeylerinde, yüksek enerjili elektronların etkisiyle çok küçük noktalara dahi odaklanabilen ışın ile, yüzeylerin taranarak farklı sinyaller üretmesi ilkesine dayanmaktadır. İlk aşamada elektron toplulukları, anot tabakasıyla hızlanarak yüzeylerin taramasını gerçekleştirmektedir. Daha sonra ortaya çıkan elektronlar ile ışımaların görüntüleri, uygun algılayıcılar tarafından sinyal çoğaltıcıya verilerek görüntü ekranına yansıtılmaktadır (Şekil 1.19).



Şekil 1.19. SEM analiz şeması (Walock, 2012)

1.8. Enerji Yayınımı X-ışını (EDX)

Enerji yayınlı X-ışını (EDX) malzemelerin temel yapıdaki bileşenlerini X-ışını kullanılarak analiz etmek için kullanılan bir tekniktir. EDX sistemleri, mikroskobun görüntüleme yeteneğinin ilgili numuneyi tanımladığı yerde, elektron mikroskobu aletlerine (SEM veya TEM) olan eklentilerdir. EDX analizi tarafından üretilen bilgiler spektrumlardan meydana gelmektedir. Bu spektrumlar, numunenin yapısındaki elementlerin elektronlara maruz kalmasından dolayı yayılan X-ışınlarıdır. Bu teknikte bir numunenin temel haritalanması ve görüntü analizlerinin yapılması da mümkündür. Analiz edilen numuneye ait olan bütün elementlere özel spektrumlar üretilmektedir. Bu teknik ile nicel, nitel analizlerinin yanısıra elementlerin dağılım haritaları da yansıtılabilmektedir.

1.9. Tezin Kapsamı

Günümüzde cam, karbon, aramid fiber v.b. takviyeli kompozit malzemelerin kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır. Aramid ve karbon fiber kompozitler düşük

yoğunluğa, yüksek darbe dayanımına, yüksek aşınma dayanımına, yüksek yorulma dayanımına ve titreşim sönümlenme özelliklerine sahiptirler. Aynı zamanda manyetik değillerdir ve üretimde kolaylık sağlarlar. Yapılan son çalışmalarda kompozitlere nanoparçacık ilavesi, elyaf takviyeli kompozitlerin aşınma mukavemetini arttırdığını göstermektedir. Elyaf takviyeli kompozit malzemelerin elyaf-matris arayüz direncini arttırmak için çeşitli nanopartiküller kullanılmaktadır. Bunlardan biri olan HNT'ler yüksek en-boy oranına sahip olmaları ve polimer matriste kolaylıkla dağılabilmeleri sayesinde matrislerden nanotüplere yük transferini kolaylaştırarak kompozit malzemelerin dayanımlarının artmasına yardımcı olmaktadır. Yeni bir tür katkı malzemelerinden olan HNT'ler doğal olarak bulunabilmektedirler ve kompozitlerin mekanik ve ısıl özelliklerinin iyileştirilmesinde de büyük rol oynamaktadırlar. HNT'ler, karbon nanotüplere (CNT) en-boy oranı bakımından benzemesinin yanı sıra CNT'lere kıyasla daha düşük maliyetli olmaları nedeniyle nanokompozit üretimi için alternatif oluşturmaktadırlar. HNT kullanılarak üretilen kompozitler daha düşük maliyetle elde edilen ısıl, mekanik ve biyolojik özellikler sunarak yüksek performans istenen uygulamalarda yüksek maliyetli CNT'lerin yerini alabilmektedirler. Ayrıca kompozit malzemeler, yüksek maliyetli CNT yerine homojen olarak dağılan HNT kullanılarak üretilirse aşınma, çekme, sertlik ve kırılma özelliklerinde iyileşmeler görülmektedir. Tezin kapsamına gelecek olursak, HNT'lerin farklı koşullar altında kompozite ilavesi gerçekleştirilerek sonuçları verilmiştir. Bu sayede literatürde az sayıda bulunan HNT'lerin önemi vurgulanmıştır.

1.10. Tezin Ana Hattı

Yazılmış olan tezin içerisinde öncelikle, giriş bölümünde çalışma ile ilgili kısa bilgilerin yanısıra, tezin kapsamına ve amacına dair bilgilere daha kapsamlı şekilde açıklanarak yer verilmiştir. Daha sonra kapsamlı bir literatür incelemesi tartışılarak icra edilmiştir. Bir sonraki bölüm olan materyal ve yöntem başlığı altında deneylerde kullanılan malzemeler ve kompozitin üretim aşaması özetlenmiştir. Dördüncü başlık altında ise üretilen kompozit malzemenin deneysel etkilerine yer verilmiş, mekanik özellikleri üzerindeki etkileri tartışılmıştır. Son kısımda çalışmalar neticesinde ortaya çıkan sonuçlar verilmiş ve gelecekte ne gibi yararları olacağı aktarılmıştır.

1.11. Tezin Amacı

Üzerinde çalışacağımız bu tezin temel amacı; Halloysit nanotüp katkısının, gün geçtikçe kullanım alanları ciddi oranda artış gösteren karbon-aramid elyaf takviyeli kompozitler üzerindeki mekanik ve aşınma testlerinin etkilerini araştırmak ve iyileştirme üzerine çalışmalar yapmaktır. Elyaf takviyelerinin, mukavemet ve sertliği artırmasının yanı sıra HNT katkısıyla beraber aşınmayı da azalttığını yapacağımız deneyler ile göstermeyi amaçlamaktayız. Bu çalışmamız ile birlikte havacılık üretim endüstrisinde önemli bir yol alınması planlanmakta, üretim ve maliyet konusunda ise önemli gelişmelerin olmasına altyapı hazırlanmaktadır.



2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Yaşadığımız zaman diliminde ihtiyaçlara göre yeni teknolojinin yardımıyla birçok çözümler türetilmiş ve türetilmeye de devam etmektedir. Birçok mühendislik alanının yanısıra metalurji ve malzeme bilimine de bu çalışmalarda fazlasıyla yer verilerek teknolojiye ayak uydurmuş ve üretimde sürdürülebilirliği sağlamıştır. Günümüzde tercih edilen en popüler malzeme kompozit yapılardır. Kompozit malzemeler, en az iki malzemenin makro düzeyde etkileşime girmesiyle ortaya çıkan, daha üstün mekanik özelliklere sahip malzemelerdir. Genel olarak üç ana bölümden oluşmaktadır. Bu bölümler sırasıyla metaller, seramikler ve organik malzemelerdir. Bu çalışmada, karbon-aramid nanokompozitlere halloysit nanotüp eklenerek değişikliğe uğramış epoksi matris kullanılmış ve vakum destekli bir el yatırma yöntemi kullanılarak üretilmiştir. Numunelerin sertlikleri Brinell sertlik testi ile, tribolojik özellikleri ise ball-on-disk aşınma testleri ile belirlenmiştir. Ayrıca numunelerin aşınma mekanizması SEM görüntüleri kullanılarak, aşınmış yüzeylerin elementel analizi ise EDX kullanılarak incelenmiştir.

Karbon-aramid fiberler daha çok epoksi, polyester, reçine, termoset polimerlerin yapılarına eklenerek daha güçlü ve daha faydalı yeni kompozit malzemelerin üretiminde kullanılmaktadır. Bu kısımda literatürde HNT katkılı karbon-aramid nanokompozitler üzerinde yapılan çalışmalara yer verilmiş ve üzerinde çalıştığımız tezin literatürdeki yeri tanımlanmıştır.

2.1. Literatür Araştırması

Lisuzzo ve ark. gömülü parafin mumu/HNT mikroküreleri içeren bir hidroksipropil selüloz matrisine bağlı olarak, kültürel mirasın onarımı ve korunması, paketleme amaçları için koruyucu malzeme olarak bir film hazırlamışlardır. Hazırlanmış hidroksipropil selüloz/mum/halloysit filmler üzerinde boyanabilirlik, ısı depolama, şeffaflık ve ıslanabilirlik yeteneği ile sonuçlanmışlardır (Lisuzzo ve ark., 2021).

Son dönemlerde Rozhina ve ark. akciğer kanser hücrelerinde (A549) HNT'lerin, kaolinit nanotabakaların (Kaol), çok duvarlı karbon nanotüplerin (MWCNT) ve grafen oksit (GO) nanotabakaların emilimini ve sitotoksik etkilerini nispeten incelemişlerdir. HNT'lerin ve Kaol'ün ağır hasara yol açmadan hücreler tarafından aktif olarak emildiğini ortaya koymuşlardır. Buna rağmen MWCNT ve GO, daha yüksek sitotoksik ve genotoksik etkilere sahiptir (Rozhina ve ark., 2021).

Farklı bir çalışmada Lisuzzo ve ark., selüloz bazlı sanat eserlerinin kendi kendini iyileştirme ve uzun süreli korunma uygulamasında, kağıdın muhafazası ve asitten arındırılması süresince yeni bir tutanak hazırlamak için HNT'leri magnezyum oksit (MgO) ile yüklemişlerdir (Lisuzzo ve ark., 2021).

Bir inceleme çalışmasında Bertolino ve ark., HNT bazlı biyo nanokompozitlerin korozyondan korunma, kültürel mirasların onarımı, biyotıp ve paketleme gibi uygulamalar için önerildiğini göstermişlerdir (Bertolino ve ark., 2020).

Ma Zhi ve arkadaşları yapmış oldukları çalışmalarında, HNT parçacıklarının günümüzde henüz çok yeni araştırma konusu olarak gündeme geldiğini ve HNT'lerin kolaylıkla elde edilerek diğer karbon nanotüpler (CNT) gibi maliyetlerinin oldukça ucuz olduklarını savunmuşlardır. Ayrıca HNT'lerin en-boy oranları CNT'lerinki gibi olup, bunun yanısıra iç yüzeylerinde alüminol grupları ve dış yüzeylerinde ise silanol gruplarıyla birlikte düzenli bir yapıya sahip olduklarını, HNT'lerin polimerlerin mekanik özelliklerini artırmasının yanısıra çeşitli potansiyel uygulamalar (moleküler emilimi, moleküler kapsülleme, depolama, taşıma katalizörü ve destekleyici katalizör) için öncelik gerektiren maddeler haline geldiğini göstermişlerdir. Daha sonra HNT'lerin uygulamalarına ilişkin kristal yapıları, kimyasal ve morfolojik özellikleri, emilimi, taşınması ve katalizör reaktivitesi hakkında kapsamlı olarak çalışmışlardır (Ma ve ark., 2012).

Liu ve arkadaşları HNT'lerin yüksek mekanik mukavemetine, ısı kararlılığı, biyo uyumluluğa ve bolluğa sahip olduğunu savunarak çalışmalarında HNT-polimer nanokompozitlerin geliştirilmesine yönelik yapılmış olan çalışmalar üzerinde durmuşlardır. Ardından HNT'lerin üretimi için kovalent veya kovalent olmayan işlevselleştirme metodları, HNT-polimer nanokompozitlerin üretim metodları üzerinde tartışmışlardır. Daha sonra HNT takviye edilmiş polimer nanokompozitlerin yüksek derecede arttırılmış çekme ve eğilme mukavemetine, elastik modüle ve geliştirilmiş tokluğa sahip olduğunu görmüşlerdir. Ayrıca HNT-polimer nanokompozitleri yüksek ısı direnç, alev geciktirme ve kendine özgü kristalleşme davranışı da göstermişlerdir. HNT'lerin biyo uyumluluğu ve tübüler mikro yapılarından dolayı, HNT-polimer nanokompozitleri iyi ilaç kapsülleme ve sürdürülebilir salım yeteneği göstererek doku mühendisliği yapı iskelesi ve ilaç taşıyıcıları olarak geniş kullanım alanlarına sahip olmuşlardır (Liu ve ark., 2014).

Pal ve arkadaşları karışmayan polimer harman sisteminden nanokompozit üretimi üzerine çalışmalar yapmışlardır. İlk olarak HNT'leri polietilenimin (PEI) ile

güçlendirerek, HNT katkıli nanokompozit hazırlamak için eriyik karıştırma işlemi sırasında karışmayan harman sistemi içerisine eklemişlerdir. PEI aşılı HNT'lerin oluşumlarını FTIR analizi ile desteklemişlerdir. Daha sonra SEM ve TEM görüntüleri ile nanokompozitlerin yapılarını karakterize etmişler, depolama modülünü ise Dinamik ve Mekanik Analizi (DMA) cihazı tarafından incelemişlerdir. Çekme testleri işlenmemiş karışımlara kıyasla nanokompozitlerin daha iyi çekme özelliklerinin olduğunu göstermiştir. Kısacası HNT'lerin harmanlama sisteminde çekirdekleştirici birimle birlikte takviye edici olarak hareket ettiği anlaşılmıştır (Pal ve ark, 2012).

Araştırma konumuz itibarıyla bize öncelik eden Şükür ve Onal yapmış oldukları çalışmalarında geliştirilmiş tribolojik performansa sahip bazalt-epoksi çok ölçekli kompozitler üzerine grafen nanoplatelet (GNP) takviyesi uygulamışlardır. Epoksi matrisin zayıf direncine sahip olduğunu savunarak nano boyutlu parçacıklarla matrisleri güçlendirmenin, üretilen çok ölçekli kompozitlerin tribolojik özelliklerini geliştirdiğini görmüşlerdir. Bu yüzden epoksi matrisleri çeşitli GNP konsantrasyonları ile güçlendirmişler ve akabinde bazalt-epoksi (BF-EP) kompozitlerini vakumlu torbalama yöntemi ile üretmişlerdir. Gerilme mukavemeti ve modülü saf BF-EP tabakalarına kıyasla sırasıyla %42,5 ve %74,5 arttığı görülmüştür. Sonuçta ise GNP takviyeli BF-EP kompozitler %60 daha yüksek aşınma mukavemeti sergilemişlerdir. Ayrıca yapmış oldukları çalışma ile elektron mikroskobu ve ısı kamera kayıtlarına dayalı olarak GNP ile güçlendirilmiş BF-EP kompozitlerin tribolojik davranışlarını temsil etmek için aşınma mekanizması önermişlerdir (Sukur ve Onal, 2020).

Bir başka çalışmada Yang ve arkadaşları, HNT'lerin birçok farklı alanda uygulama potansiyeline sahip olan doğal mineral kil nanotüpler olduğunu belirterek HNT'lerin yüzeylerini değiştirmenin uygulamaları genişletmek için çok önemli bir unsur olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca çalışmalarında yüzeyleri değiştirilmiş HNT'lerin yapısal özelliklerine, performanslarına ve ilgili oldukları uygulamalara da yer verilmiştir. Yüzeyi değiştirilmiş HNT'ler, yüzey modifikasyonunun malzemeler üzerindeki etkileri ve çeşitli bölgelerdeki bağlantılı uygulamalar üzerinde odaklanmışlardır. Yapmış oldukları bu çalışma yeni nano malzemeler alanında HNT modifikasyonunun uygulanması için yardımcı olmaktadır (Yang ve ark., 2017).

Gaaz ve arkadaşları ise HNT'lerin kopma dayanımı, elastisite modülü, darbe dayanımı ve ısı kararlılık gibi polimerlerin mekanik ve ısı özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Polimerlerin hem mekanik hem ısı özelliklerinin HNT katkısıyla önemli ölçüde iyileşme gösterdiğini görmüşlerdir. Ayrıca polimerin

bozunmasında, HNT'lerin düşük bir yüzdesi ile modifiye edilerek, önemli ölçüde iyileşme göstermiştir (Gaaz ve ark., 2017).

Buruga ve Kalathi camlarda kullanılmak üzere polimetil metakrilat (PMMA) ve polistiren (PS) nanokompozit kaplamalarına HNT ilave ederek mekanik ve termal özelliklerindeki değişimleri araştırmışlardır. Bu çalışmalarında ultrason destekli çözüm karıştırma metodunu kullanmışlardır. Elde edilen kaplamaların, soda-kireç camının dört farklı tipi üzerine daldırma ile kaplanarak izgesel ve mekanik özelliklerini analiz etmişlerdir. Deney sonucunda kaplanmış cam numunelerinin saf olanlarına kıyasla izgesel değişiklik olmamasına rağmen daha iyi çizilme mukavemetine ve yüzey su geçirmezliğine sahip olduğu görülmüştür. Bunun yanısıra nanokompozitlerin de termal ve mekanik özellikleri iyileşme göstermiştir. Yapılan çalışma sonucunda HNT takviyeli PMMA ve PS nanokompozit kaplamaların, otomotiv ve inşaat sektöründe camlar için daha etkin bir şekilde kullanılabilceğini söylemişlerdir (Buruga ve Kalathi, 2018).

Başka bir çalışmada Ulus ve arkadaşları deniz suyu ile yaşlandırılmış olan bazalt fiber (BF) takviyeli epoksi (EP) kompozitlerin kesme ve MOD II kırılma performansları üzerinde HNT'lerin deneysel etkilerini araştırmışlardır. Deniz suyu ortamında yapılan son çalışmalar göstermiştir ki, HNT'lerin polimer matrislere dahil edilmesi verimli bir bariyer etkisi oluşturmuş ve gelişmiş fiber matris arayüzü kombinasyonu sunmuştur. Çalışma sonucunda HNT takviyeli kompozitlerin saf numunelere göre %34 kesme mukavemeti ve %46 MOD II delaminasyon tokluğu sergilediği görülmüştür. Ayrıca mekanik performanslardaki azalma taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizlerinde doğrulanmıştır. Bunun yanısıra kimyasal bozulma da Raman spektroskopisi ile araştırılmıştır (Ulus ve ark., 2021).

Ulus ve arkadaşları yapmış oldukları bir başka çalışmalarında cıvatalı bazalt-epoksi kompozit laminatların farklı darbe enerjileri altındaki dinamik yükleme tepkilerini araştırmışlardır. Darbe etkilerini daha açık bir şekilde ortaya çıkarmak için testleri cıvatanın üstü (ToB) ve pulun kenarında (SoW) gerçekleştirmişlerdir. Ayrıca HNT takviyesinin numune üzerindeki darbe tepkisi ve hasar yayılımı üzerindeki etkileri de değerlendirilmiştir. Sonuçta HNT'ler özellikle düşük darbe enerjilerindeki darbe dayanımını yaklaşık olarak %15 arttırmıştır. Elde edilen sonuçları makro boyutlu görüntüler ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile desteklemişlerdir. Yapmış oldukları bu çalışma ile denizcilik endüstrisinde kullanılan cıvatalı kompozit bağlantılarının kapsamlı bir darbe testi çalışması sunmuşlardır (Kaybal ve ark., 2021).

2.2. Literatürde Oluşan Boşluklar

Yapmış olduğumuz çalışmalara başlamadan önce ilk olarak detaylı bir literatür araştırması içerisine girilmiş olup daha önceki çalışmalarda olan eksiklikler tek tek tespit edildikten sonra bunların üzerinde yoğunlaşarak nasıl bir yol izlenmesi gerektiği kararlaştırılmıştır. Ayrıca aşınma deneylerinin hangi koşullar altında yapılması gerektiği de literatür çalışmalarından tespit edilmiştir. Tüm bu çalışmalardan sonra kompozit malzemelerin yapısı bakımından değerlendirildiklerinde, günümüz dünyasında yeni ve ileri teknolojiye ayak uyduran malzemeler olarak dikkat çektikleri görülmüştür. Çevresel faktörlerin etkisiyle yeni arayışlar içerisine giren toplumun önde gelenleri cam ve karbon gibi inorganik fiber takviyeli polimer kompozitlerin alternatiflerini aramaya başlamışlar, bunun sonucunda ise doğal ve organik yapıları fiber malzemelerin katkısıyla polimer kompozitlere olan ilgi artmıştır. Halihazırda dünya çapında doğal fiberlerin kompozit yapısında kullanımları %10 civarındadır (Fragassa, 2017). Kompozit malzemelerin en önemli özelliği olan mikro düzeyde homojen yapıda olmaları alanında daha çok tercih edilmelerine neden olmaktadır.

Karbon-aramid nanokompozitler üzerinde yapılan çalışmalar göstermiştir ki yapısal incelemelerin yanısıra daha çok eğilme, çekme, kesme, basma ve delme gibi mekanik özelliklerinin üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmamızda ise HNT katkısının farklı kombinasyonlar içerisinde karbon-aramid nanokompozitlerin aşınma ve mekanik davranışları üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Halloysitler içi boş silindirik bir yapıyla birlikte yüksek en/boy oranlarına sahip, çok katmanlı inorganik nanotüplerdir. Ayrıca matrislerle nanotüpler arasındaki yük transferinin kontrolünü sağlayarak polimerlerin mukavemetlerindeki artışa yardımcı olmaktadır. Halloysit nanotüpler doğada kolaylıkla bulunabildiği için üretim maliyetleri çok daha ucuz olup aynı zamanda biyoyumlu yapısıyla da ön plana çıkmaktadır. Tüm bu söylenenlere ilaveten HNT katkısının kompozitlerin yüzey alanlarının iyileşmesine katkı sağlayacağı amaçlanmakta aynı zamanda aşınma miktarının da azalmasına neden olacağı öngörülmektedir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Karbon-Aramid Fiber Takviyeli Hibrit Kompozitlerin Üretimi

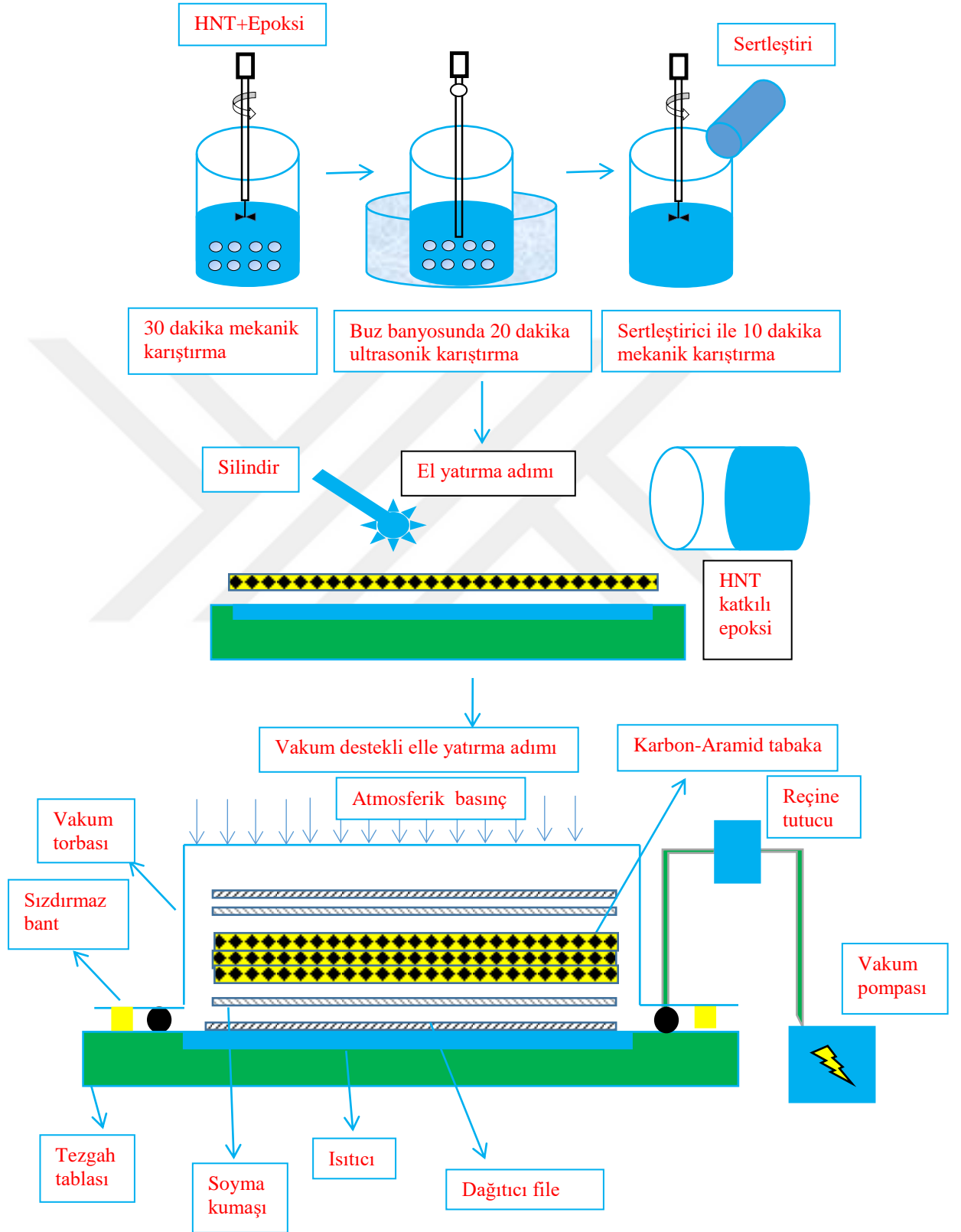
Bu deneysel çalışmada, saf ve HNT katkılı karbon-aramid elyaf takviyeli hibrit kompozitlerin aşınma testleri yapılmıştır. Kompozit numunelerin üretimi için %50 karbon - %50 aramid kumaş ile 200 g/m^2 ağırlığına sahip elyaf ve Hexion LR 160 (kürleme maddesi) epoksi kullanılmıştır.

Balıkesir'deki (Türkiye) maden yataklarından çıkarılan hallosit nanotüpler, Eczacıbaşı grubu ESAN şirketi tarafından temin edilmiştir. X-Ray Floresan kimyasal analizi de yine Eczacıbaşı grubu ESAN şirketi tarafından sağlanmıştır. Kuru kütlelerin kızdırma kayıpları: %16.75, SiO_2 : %43.3, Al_2O_3 : %38.4, Fe_2O_3 : %0.8, TiO_2 : %0.1, CaO : %0.08, MgO : %0.12, Na_2O : %0.17, K_2O : %0.12 şeklindedir.

Cavallora ve arkadaşları, farklı madenlerden HNT'lerin mezoskopik yapılarına ilişkin çok belirgin farklarının olduğunu göstermişlerdir (Cavallaro ve ark., 2018). Bu yüzden, aynı yataktan elde edilen HNT'lerin geçmiş çalışmalarda kullanıldığını ve yarı statik penetrasyon, çekme, basma, eğilme, darbe, kırılma testlerinde kusursuz mekanik özellikler gösterdiğini açıklamak gerekmektedir (Du ve ark., 2010). Bununla beraber aynı HNT'ler, aktif gıda ambalaj malzemeleri (HNT'ler/polietilen nanokompozitler) için etilen gaz soğurucuları olarak kullanılır ve tıp, tarım, kozmetik endüstrilerinde sitotoksik olmayan olası bir uygulama elde etmek için poli (MPAEMA)/hallosit nanokompozitlerin üretiminde kullanılır (Tas ve ark., 2017).

HNT'ler, 10-30 nm'lik iç çapa, 30-100 nm'lik dış çapa ve ortalama $1.2 \mu\text{m}$ uzunluğa sahip nanopartiküllerdir. İlk olarak epoksi içerisine ağırlıkça %2 oranında HNT dağıtılmıştır. Daha sonra 20 dakika ultrasonikasyon ve 30 dakika mekanik karıştırma uygulanmıştır (Çetin ve Tatar, 2021). Bu çalışmada aynı türünü kullandığımız epoksi matris içerisinde ağırlıkça %2 olan HNT'nin çeşitli yükleme koşulları altında, en yüksek mekanik özelliklerini gösterdiği çalışmalar literatürde bulunmaktadır (Ulus ve ark., 2018). Bu yüzden, bu tez çalışmasında deneyleri yapmak için ağırlıkça %2 HNT katkısı seçilmiştir. HNT/epoksi karışımı, kür maddesine eklenmiş ve kompozit imalatından önce 10 dakika boyunca karıştırılmıştır. HNT/epoksi karışımları hazırlandıktan sonra, karbon-aramid elyaf katkılı hibrit kumaşlardan kesilen 10 adet tabaka, epoksi uygulanarak el yardımıyla istiflenmiştir. Son olarak, nanokompozitlerin üretimi vakum destekli el yatırma yöntemi kullanılarak yürütülmüştür (Şekil 3.1). Nanokompozitler, PLC kontrollü bir ısıtıcı tabla kullanılarak

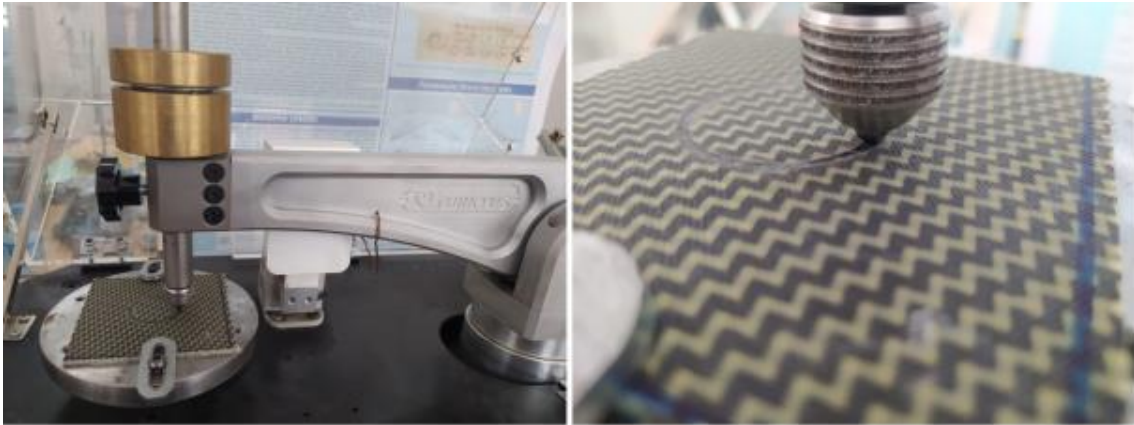
110 °C'de 60 dakika süreyle kürlenmiş, ayrıca saf karbon-aramid elyaf takviyeli kompozitler de aynı prosedür uygulanarak üretilmiştir.



Şekil 3.1. Karbon-aramid hibrit kompozit üretiminin şeması

3.2. Tribolojik Testler

Ball-on-disk aşınma testlerinin numuneleri 100x100x25 mm boyutlarında olup kompozit plakalardan kesilmiştir. Numunelerin aşınma performansı, ASTM G99 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Saf ve HNT katkıli karbon-aramid kompozitlerin tribolojik performansını araştırmak için ball-on-disk aşınma test cihazı (TurkYus-PODWT) kullanılmıştır (Şekil 3.2). 62 HRC sertliğe ve 6 mm çaplarına sahip olan çelik bilyeler (AISI 52100), aşındırıcı olarak kullanılmıştır. Her bir aşınma testi için yeni bir çelik bilye kullanılmıştır. Aşınma numunelerine, aşınma yükü ve kayma hızı test parametrelerini en iyi şekilde kullanmak için ön test uygulanmıştır. Ön testlerden yola çıkarak kayma hızı 1 m/s olarak seçilmiş, aşınma yükleri de 10N, 15N ve 20N olarak belirlenmiştir. Ball-on-disk aşınma testleri 25°C'de 2000 m için gerçekleştirilmiş ve aynı parametreler altında üç kez tekrarlanmıştır. Ortalama değerler sonuç olarak kabul edilmiştir. Buna ek olarak test esnasında sürtünme katsayısı ve sürtünme kuvveti bir yük hücresi tarafından kaydedilmiştir. Ayrıca kompozit ve çelik bilye arasındaki temas bölgesi sıcaklığı, bir FLIR Systems ThermoCAM™ P65 ısı kamera kullanılarak ölçülmüştür. Isıl kamera, -40 °C ile 200 °C sıcaklık aralığına, 2 °C hassasiyete, 30 °C'de 0,08 °C ısı duyarlılığına, 320×240 piksel çözünürlüğe ve 7,5–13 µm spektrum aralığına sahiptir (Sukur ve Onal, 2020).



Şekil 3.2. Ball-on disk aşınma test makinesi ve karbon-aramid kompozit numunesi

Aşınmaya tabi tutulacak test numuneleri, aseton ile temizlenmiş, tribolojik testlerden önce ve sonra hassas terazi (10^{-4} g duyarlılıkta) kullanılarak ağırlıkları ölçülmüştür. Saf ve HNT katkıli numunelerin aşınmış yüzeyleri SEM ile analiz edilerek değerlendirilmiştir. Yüzey pürüzlülüğü, bir optik profilometre ile 3 boyutlu topoğrafik

görüntüler kullanılarak incelenmiştir. Enerji Dağılımlı X-ışını (EDX) analizi, elementlerle ilgili aşınmış yüzeyin aşınma mekanizmalarını belirlemek için kullanılmıştır. SEM ve EDX analizi için ZEISS GeminiSEM 500 FESEM kullanılmıştır.

Özgül aşınma oranı “ W_s ”, Denklem (1) kullanılarak hesaplanmıştır;

$$W_s = \frac{\Delta_m}{\rho \times F_N \times L} \text{ mm}^3/\text{Nm}$$

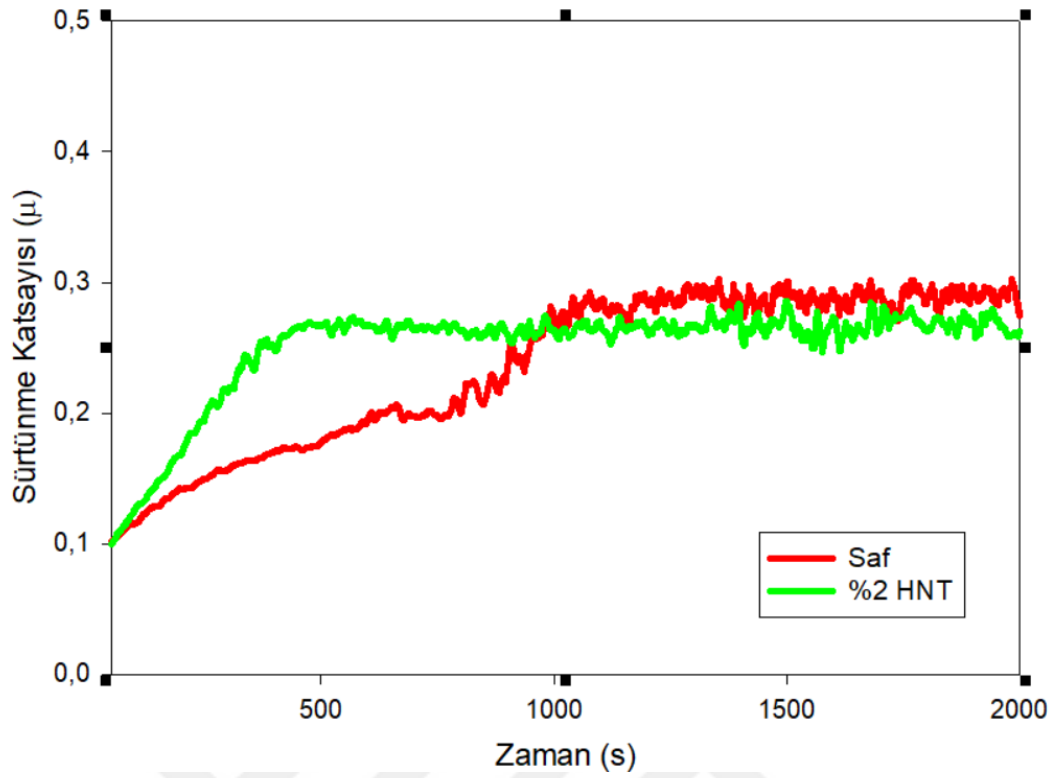
Verilen denklemde; Δ_m aşınan numunenin ağırlık kaybı (g), ρ numunenin yoğunluğu (g/mm^3), F_N uygulanan yük (N), L kayma mesafesini (m) gösterir.

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

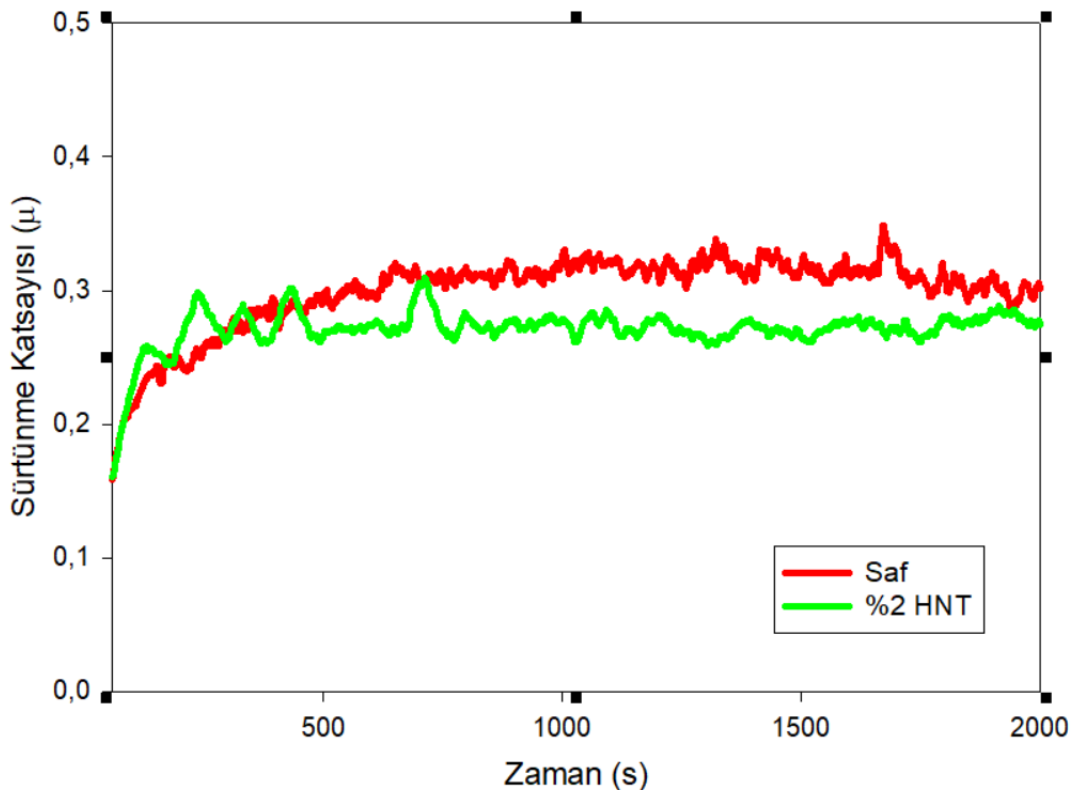
4.1. Tribolojik Performans

Üzerinde çalışmış olduğumuz kuru yağlama ve normal yükleme koşulları altında saf ve HNT katkılı karbon-aramid elyaf hibrit kompozitlerin tribolojik özellikleri araştırılmıştır. Aşındırıcı çelik bilye ve kompozit numune arasındaki ilişki, testler esnasında aşındırıcı bilye üzerine 10, 15 ve 20 N büyüklüğünde yükler uygulanarak belirlenmiştir. Saf ve HNT katkılı kompozitlerin sürtünme-kayma zamanı eğrilerindeki katsayının değişimi sırasıyla Şekil 4.1, Şekil 4.2 ve Şekil 4.3'de gösterilmiştir. HNT'lerin saf kompozitlere ilave edilmesiyle, saf numuneler ile karşılaştırıldığında nanokompozit malzemelerin sürtünme katsayısı önemli ölçüde azalmıştır.

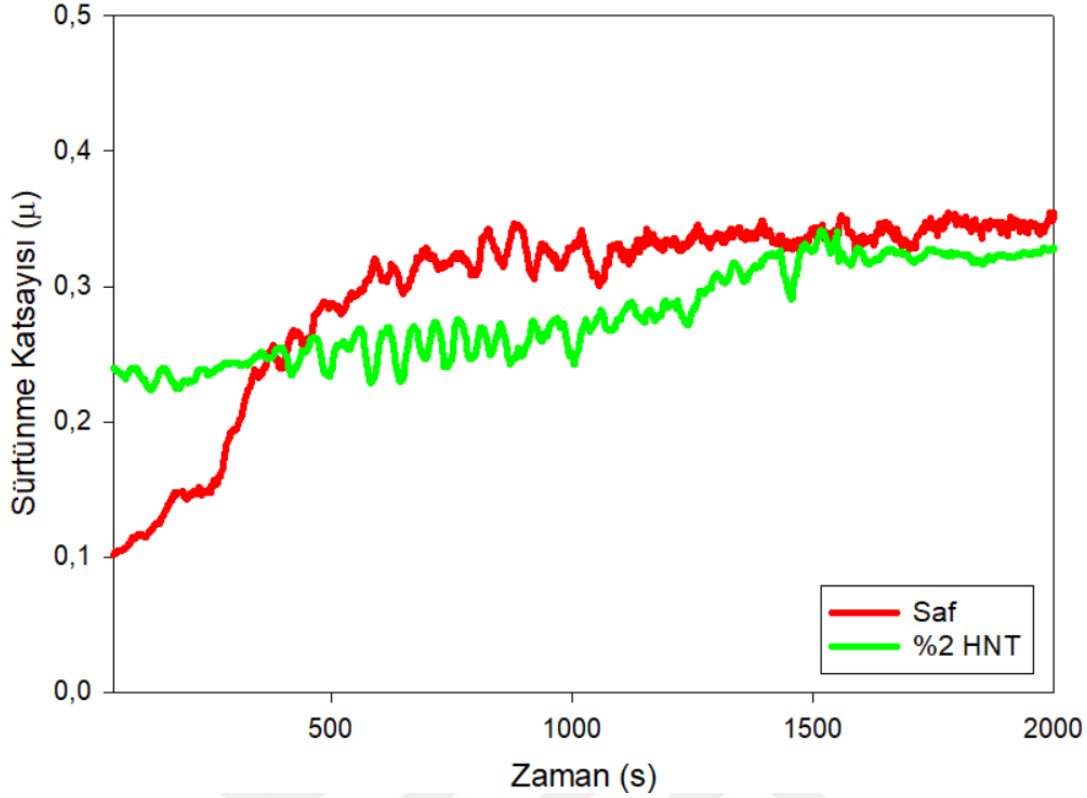
Sürtünme katsayısındaki değişim 1000 s sonra kararlı hale gelmekte ve aşınma testinin sonunda (2000 s) ise kararlı durum şartlarını takip etmektedir. 10 N yük ve kararlı durum şartları altında saf ve HNT katkılı kompozitler için sürtünme katsayısı 0,28 ve 0,25 olarak belirlenmiştir. Sonrasında ise, 15 N aşınma yükü altındaki saf ve HNT katkılı kompozitler için sürtünme katsayısı 0,3 ve 0,27 olarak belirlenmiştir. Son olarak, 20 N normal yük altında saf ve HNT katkılı kompozitler için sürtünme katsayısı 0,34 ve 0,31 olarak belirlenmiştir. Böylece tüm yükleme koşulları için HNT katkılı nanokompozitler için minimum sürtünme katsayı değerleri elde edilmiştir. Ayrıca, karbon-aramid kompozitlere %2 HNT eklenmesi sonucunda, sürtünme katsayısında yaklaşık olarak % 9 ve % 11 arasında bir azalma görülmüştür.



Şekil 4.1. 10 N yük altında sürtünme katsayısı-kayma zamanı değişimi



Şekil 4.2. 15 N yük altında sürtünme katsayısı-kayma zamanı değişimi



Şekil 4.3. 20 N yük altında sürtünme katsayısı-kayma zamanı değişimi

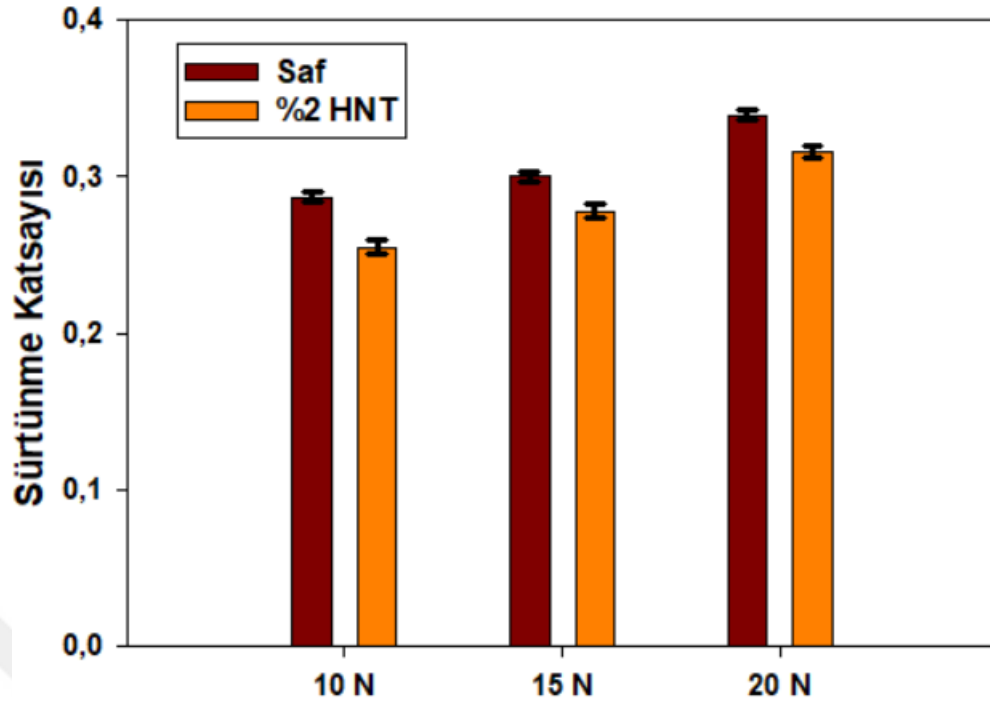
Sürtünme katsayısındaki değişimler, HNT'lerin tribofilm bazlı katı yağlama etkisinin sonucu olarak düşünülmüştür. Şekil 4.1'de incelenen HNT katkılı numuneye ait kararlı durum sürtünme katsayısının, üç yük altında kararlı durum aşınma evresinde, erken çalışma aşamasında farkedilebilir bir stabilizasyon yaşadığı gözlemlenmiştir. Kararlı durum aşınma evresi, test üzerinde çok daha erken gerçekleşmiştir. Eğer aşınma yükü 10 N'den 15 N'ye ve 20 N'ye yükselirse, HNT katkısı, kararlı durum sürtünme katsayısında daha fazla stabilizasyona neden olur. Ayrıca, 1 m/s kayma hızındaki aşınma testleri sırasında serbest bırakılan aşınma kalıntı taneleri, nanoparçacıkların boru şeklinde olması nedeniyle makaralı yataklar gibi davranırlar (Peña-Parás ve ark., 2017). HNT'ler, aşınma testi sırasında yüzeye etki eden temas basınçları nedeniyle aşındırıcı çelik bilye üzerinde biriken, teması önemli ölçüde azaltan bir tribofilm oluştururlar.

Ayrıca, HNT katkılı nanokompozitler ile çelik bilyenin karşı yüzeyi arasındaki sürgülü kontak nedeniyle aşındırıcı çelik bilyenin yüzeyinde düzenli bir transfer filmi oluşmuştur (Peña-Parás ve ark., 2017). Bu nedenle, HNT'ler aşındırıcı çelik bilyenin dinamik etkisini ve çelik bilye ile kompozit arasındaki gerilmeyi azaltmış, bunun sonucunda daha düşük bir sürtünme katsayısı elde edilmiştir (Dasari ve ark., 2007).

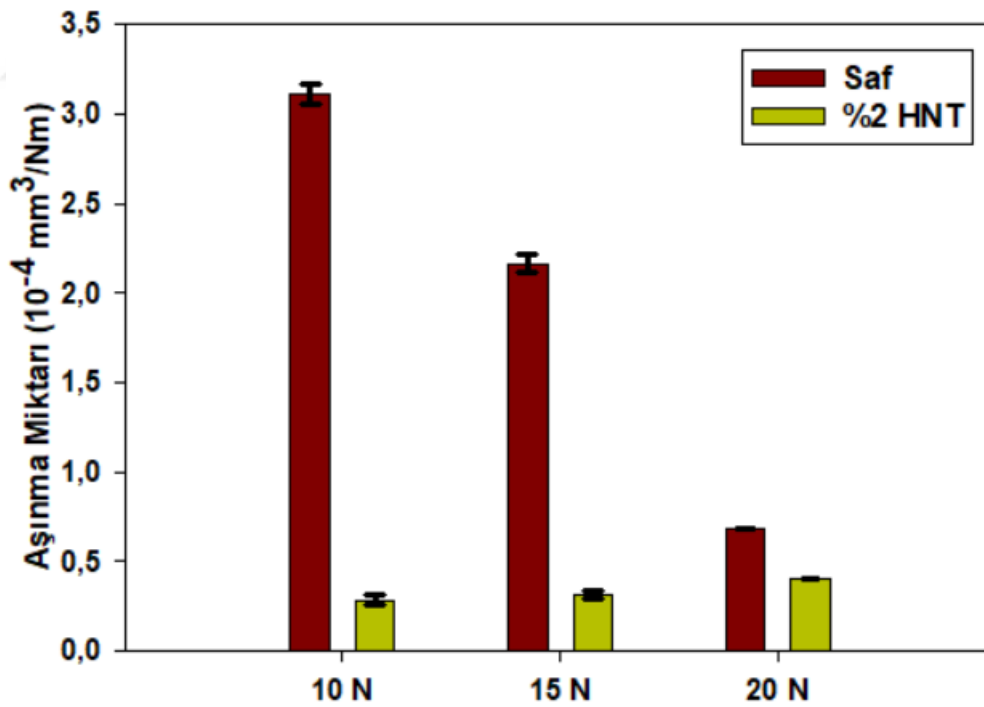
Termoset epoksinin yüksek yoğunluğu, HNT'lerin yüzeyi ve hidroksil grupları arasındaki geniş çoklu bağ düzenleri, moleküller arası hidrojen bağı ile bileşenler arasındaki kovalent bağ, polimer molekülleri ve güçlü van der Waals etkileşimleri, fiziksel çapraz bağlar gibi davranmışlardır. Sonuç olarak, azaltılmış bir sürtünme katsayısı ile gelişmiş tribolojik performanslar elde edilmiştir.

Sürtünme-aşınma yükü katsayısı arasındaki ilişki Şekil 4.4'de gösterilmiş, aşınma miktarı-aşınma yükü arasındaki ilişki ise Şekil 4.5'de gösterilmiştir. Uygulanan yükün artması ile tüm numunelerde aşınma miktarlarının azalması, temas yüzeyi basıncının artmasına neden olmuştur. Saf karbon-aramid hibrit kompozitlerin aşınma miktarları sırasıyla 10, 15 ve 20 N (Şekil 4.5) yükler altında, 3.11×10^{-4} mm³/N.m, 2.16×10^{-4} mm³/N.m ve 0.68×10^{-4} mm³/N.m olarak hesaplanmıştır. Ayrıca %2 HNT katkılı karbon-aramid elyaf hibrit nanokompozitlerin aşınma miktarları da sırasıyla 10, 15 ve 20 N yükler altında 0.34×10^{-4} mm³/N.m, 0.31×10^{-4} mm³/N.m ve 0.25×10^{-4} mm³/N.m olarak hesaplanmıştır.

Çelik bilye ile kompozit arasındaki fark, normal yükün artmasıyla ters orantılıdır. Bu yüzden aşınma kalıntıları, numune ile aşındırıcı çelik bilye arasında sıkıştırılmış, aglomeralara (birikmiş numunelere) ve tribofilmlere şekil vermeye duyarlı hale gelmiştir. Tribofilm, HNT'lerin organik formundan dolayı yeşil yağlayıcılar gibi çalışır ve normal aşınma yükündeki artış, aşınma miktarında azalmaya sebep olur (Öztürk ve ark., 2007). Adhezif aşınma mekanizması yapıya daha az zarar verir ve aktarılabilecek filmlerin oluşmasına yardımcı olur. Aktarılabilecek filmlerin sağlıklı oluşumu, aşınmada azalmaya, tribolojik performansta ise artışa imkan sağlar. 10 N, 15 N ve 20 N aşınma yükleri dikkate alındığında %2 HNT katkılı karbon-aramid elyaf kompozitler için aşınma miktarları ortalama %75 azalmıştır. Bu azalmanın üzerindeki temel neden, HNT'lerin katı yağlayıcı etkisidir. Bunun yanısıra, HNT'ler temas bölgesindeki epoksi matrisi kaplar ve böylelikle kayma esnasında sürtünmeyi ve kesme etkisini azaltır.



Şekil 4.4. Sürtünme katsayısı-aşınma yükleri arasındaki ilişki

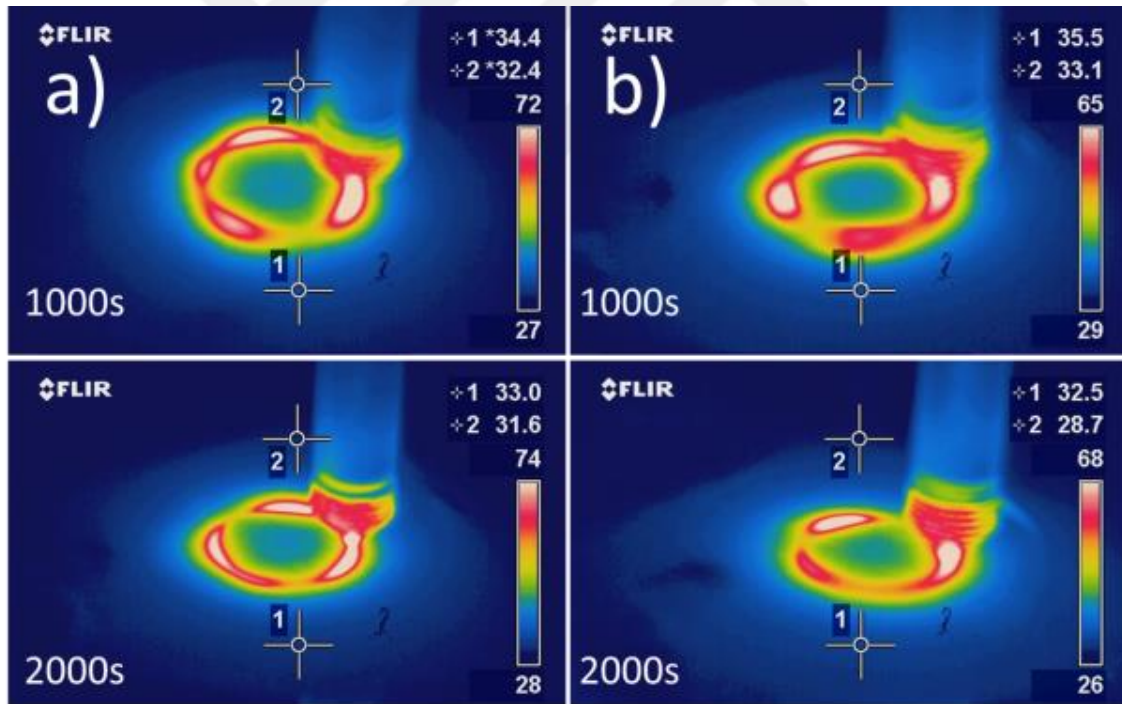


Şekil 4.5. Aşınma miktarı-aşınma yükleri arasındaki ilişki

Kompozitler ve çelik bilyeler arasındaki temas bölgesinin sıcaklıkları, saf ve HNT katkıli kompozitlerin aşınma performansını açıklamak için tribolojik testler

enasında bir ısı kamera ile belirlenmiştir. Kompozit malzemelerin ısı kararlılığı ve iletkenliği, HNT katkısıyla arttığını Mo ve arkadaşları çalışmalarında belirlemiştir (Mo ve ark., 2016).

15 N aşınma yükü altında testin 1000 s ve 2000 s zamanındaki temas alanında ortaya çıkan sıcaklık Şekil 4.6'da gösterilmiştir. Temas bölgesindeki en yüksek sıcaklık, 1000 s'den sonra saf kompozitte 72 °C, %2 HNT katkılı kompozitte ise 65 °C olarak okunmuştur. Bunun yanı sıra, temas bölgesi sıcaklığının 2000 s'den sonra saf kompozitte 74 °C ve %2 HNT katkılı kompozitte 68 °C olduğu görülmüştür. Bu nedenle karbon-aramid kompozitlerin ısı iletkenliğinin arttığı söylenebilir. Temas bölgesi saf karbon-aramid kompozit numuneye nazaran hızlı bir şekilde soğumaya başlar, çünkü HNT katkılı kompozitin ısı iletkenliği daha yüksektir. Ayrıca, numunenin ısı iletkenliği tüm yönlerde artacağı için, HNT takviyesi, temas sonucu artan ısının düzlem dışı ve düzlem içi yönlerde mümkün olduğunca çabuk dağılmasına yardımcı olur. Böylece, temas bölgesindeki ısı gözle görünür şekilde azalmıştır.



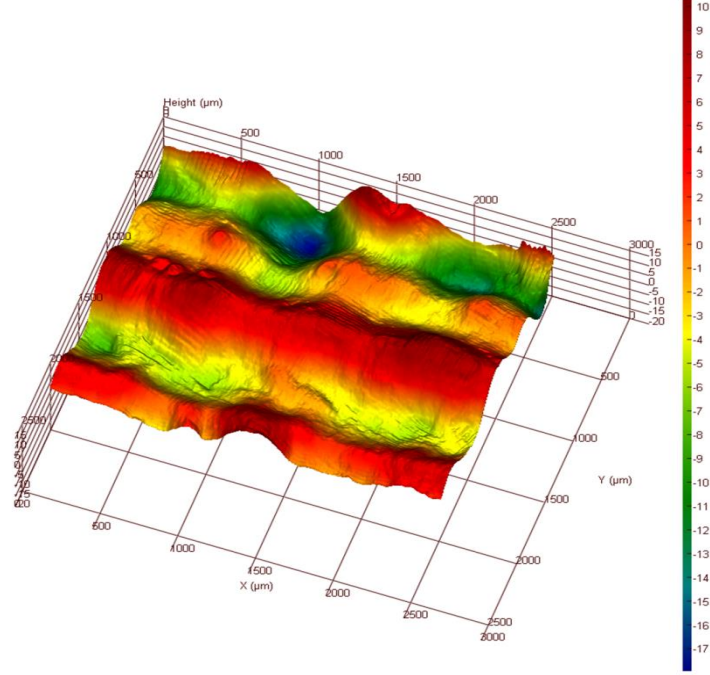
Şekil 4.6. 15 N aşınma yükü altında testin 1000 s ve 2000 saniyelerinde temas bölgesinde çıkan ısı; a) saf, b) % 2 HNT

Karbon-aramid elyaf katkılı hibrit kompozitler, yüksek mukavemet özelliklerinden dolayı aşınma yüklerine karşı koyabilirler. Ancak endüstriyel uygulamalarda kompozitin aşınma direncinde, kütleli olarak daha yüksek ve sürtünme katsayısı yönünden daha düşük olmasına ihtiyaç duyulur. HNT'lerin boru şeklindeki

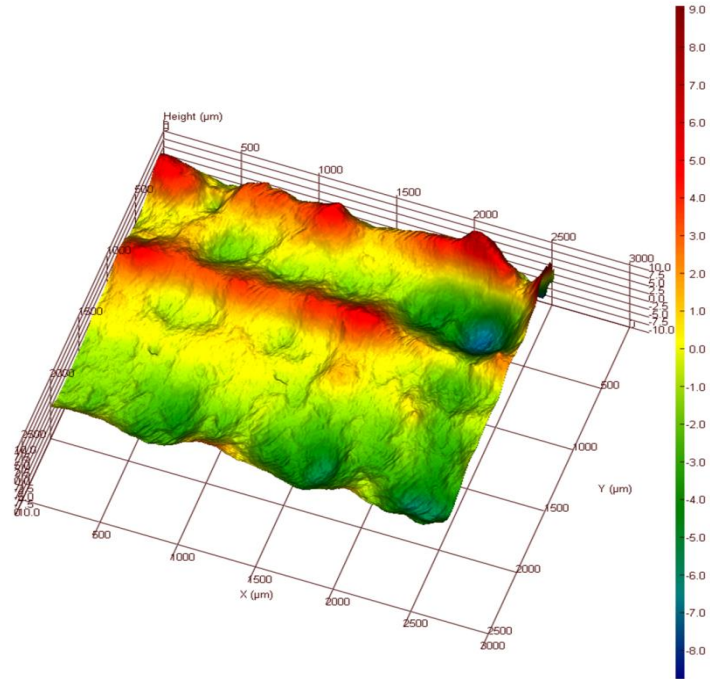
yapısı, kompozitlerin yüzeylerine uygulanan gerilmeyi taşıyarak kütle kaybına direnmesine ve daha düşük sürtünme katsayısı oluşmasına yardımcı olduğu bildirilmiştir (Ulus ve ark., 2019). Bu nedenle kompozitlere nanopartikül ilavesi daha iyi aşınma performansı üretilmesine yardımcı olur (Upadhyay ve ark., 2018). Ayrıca yüksek aşınma direnci kabiliyeti kompozitin yüzeyindeki deformasyonu azaltmış, bu yüzden yüzey pürüzlülüğünü olumlu yönde etkilemiştir (Kakisawa ve ark., 2000). Yüzey pürüzlülüğünün azalması üzerinde HNT'lerin etkisini analiz etmek için 10, 15 ve 20 N yükleme koşulları altında yüzey topoğrafya görüntüleri elde edilmiştir (Şekil 4.7-Şekil 4.8-Şekil 4.9).

10 N normal yükleme altında saf ve HNT katkılı kompozitler için elde edilen aşınmış yüzey topoğrafya görüntüleri Şekil 4.7. a) ve b) 'de verilmiştir. HNT katkılı numunelere kıyasla, saf numunenin yüzeyinde çok sayıda dalgalar belirmiştir. Nano ilavesinin katı yağlama etkisi ve adhezif aşınma mekanizması (Ma, 2015), HNT katkılı numuneler için dalgalanmaların sayısını azaltır. Bununla birlikte, adhezif aşınma eğilimindeki artıştan dolayı düzensiz plastik deformasyon, aşınmış yüzey üzerinde birçok dalgalanmalara sebep olur. 15 N ve 20 N aşınma yükleri altında saf ve HNT katkılı kompozitler üzerinde oluşmuş yüzey topoğrafya görüntüleri sırasıyla Şekil 4.8. (a, b) ve Şekil 4.9. (a, b)'de verilmiştir. HNT'lerin takviyesiyle kompozitlerin yüzey pürüzlülüğünün önemli ölçüde iyileştiği ve yüzey kalitesinin de arttığı gözlemlenmiştir. Aşınma temas bölgesindeki ısı iletkenliğinin artmasının ve aşınma ortamından ısıyı aktaran HNT'lerin sayesinde abrazif aşınma performansı başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir. 10 N ve 15 N aşınma yükleri altındaki numuneler ile 20 N aşınma yükü altındaki HNT katkılı numunelerin yüzey pürüzlülüğü kıyaslandığı zaman, aşınma miktarındaki düşüşten dolayı numunelerin yüzey kalitesinde bir artış görülmüştür.

a)

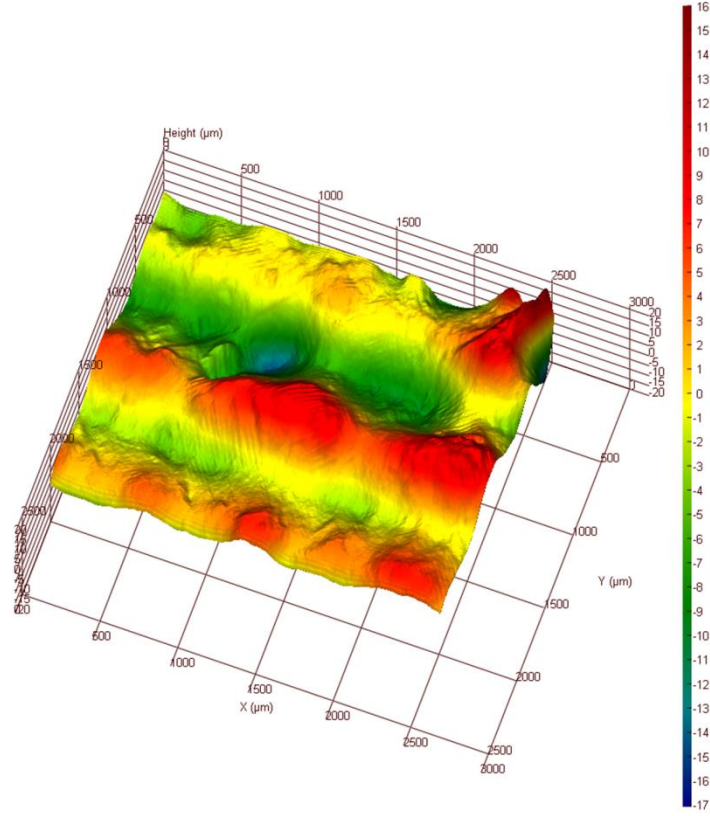


b)

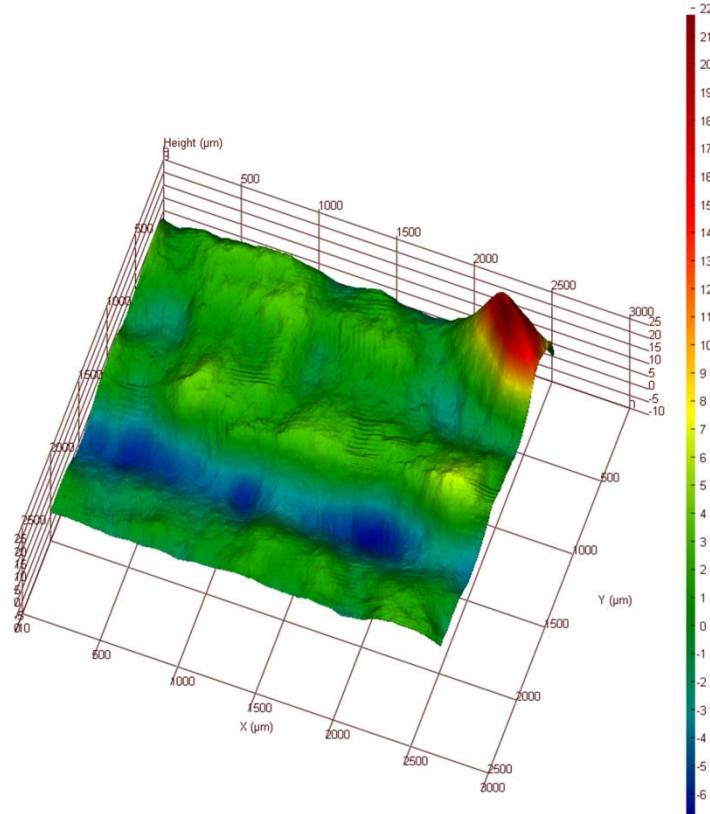


Şekil 4.7. 10 N yüklem durumunda yüzey topoğrafı görüntüleri; a) saf, b) % 2 HNT

a)

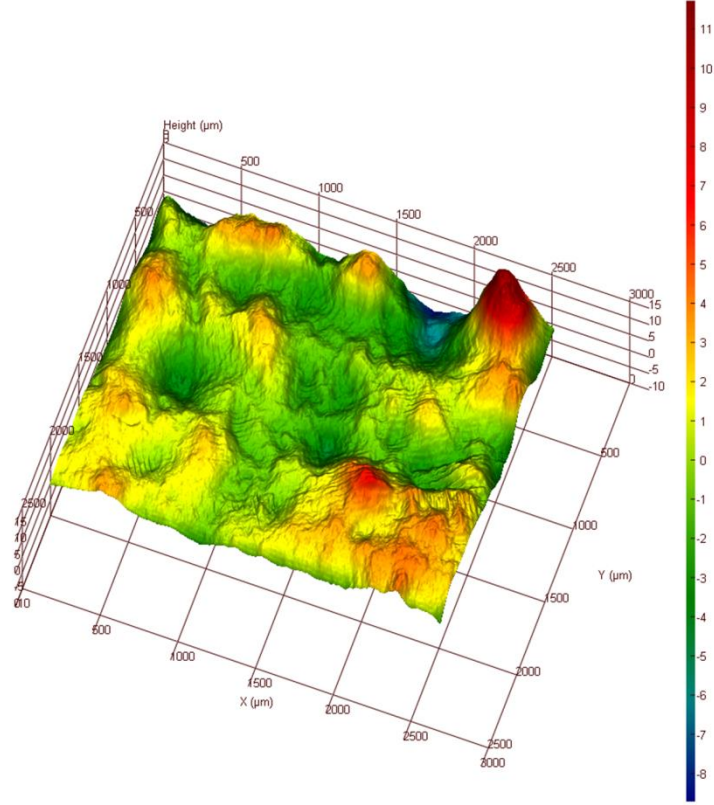


b)

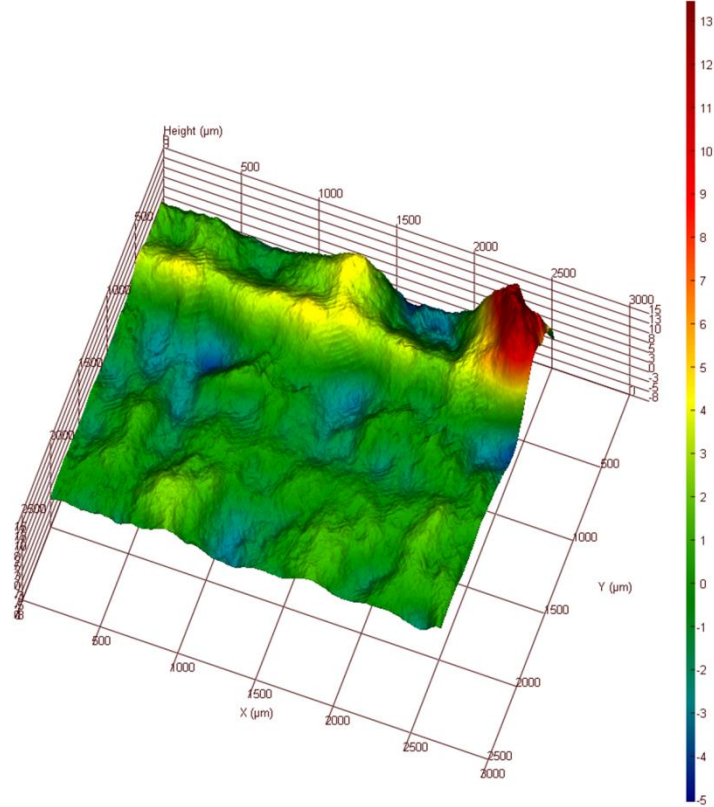


Şekil 4.8. 15 N yükleme durumunda yüzey topoğrafı görüntüleri; a) saf, b) % 2 HNT

a)



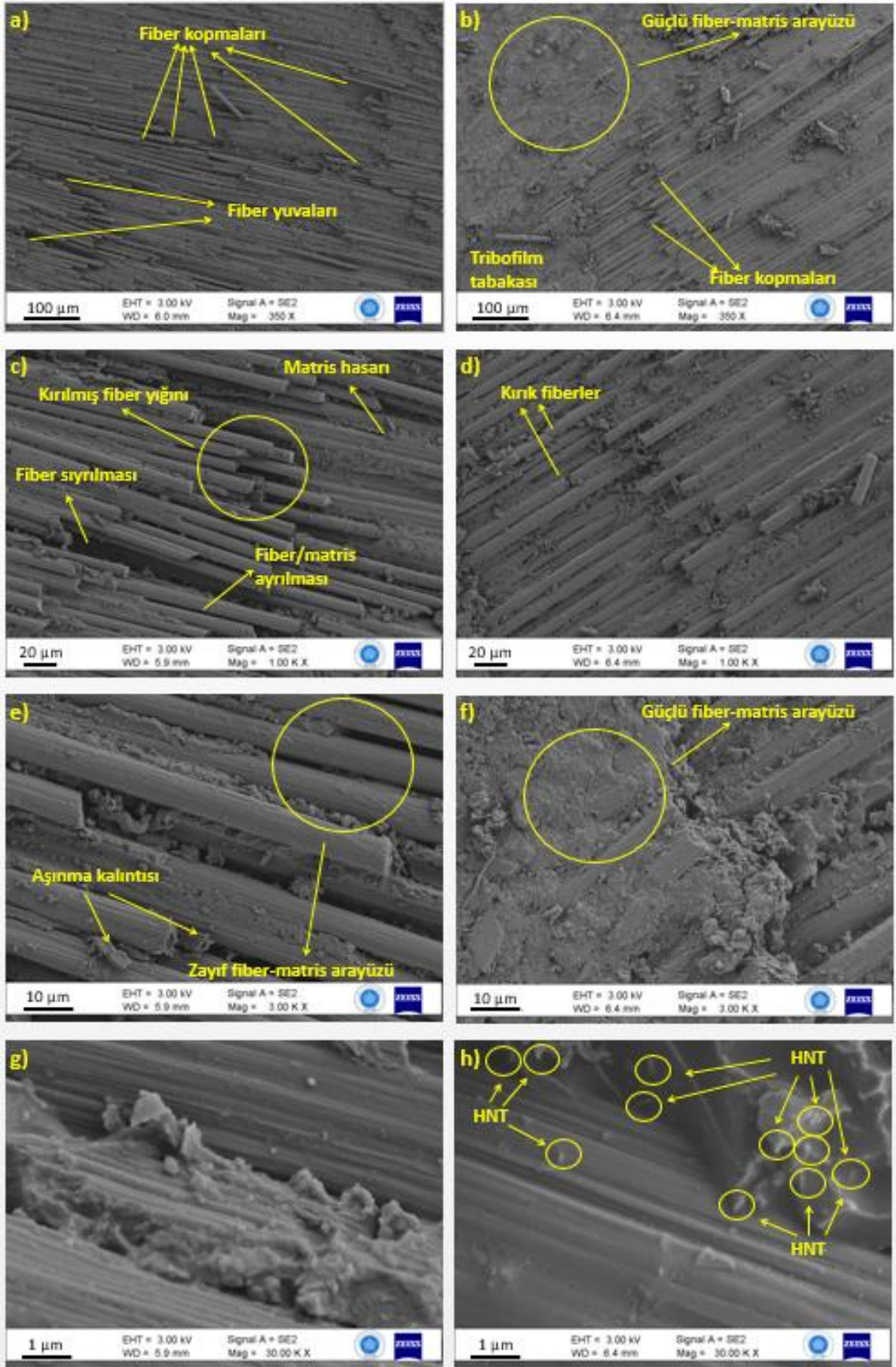
b)



Şekil 4.9. 20 N yükleme durumunda yüzey topografi görüntüleri; a) saf, b) % 2 HNT

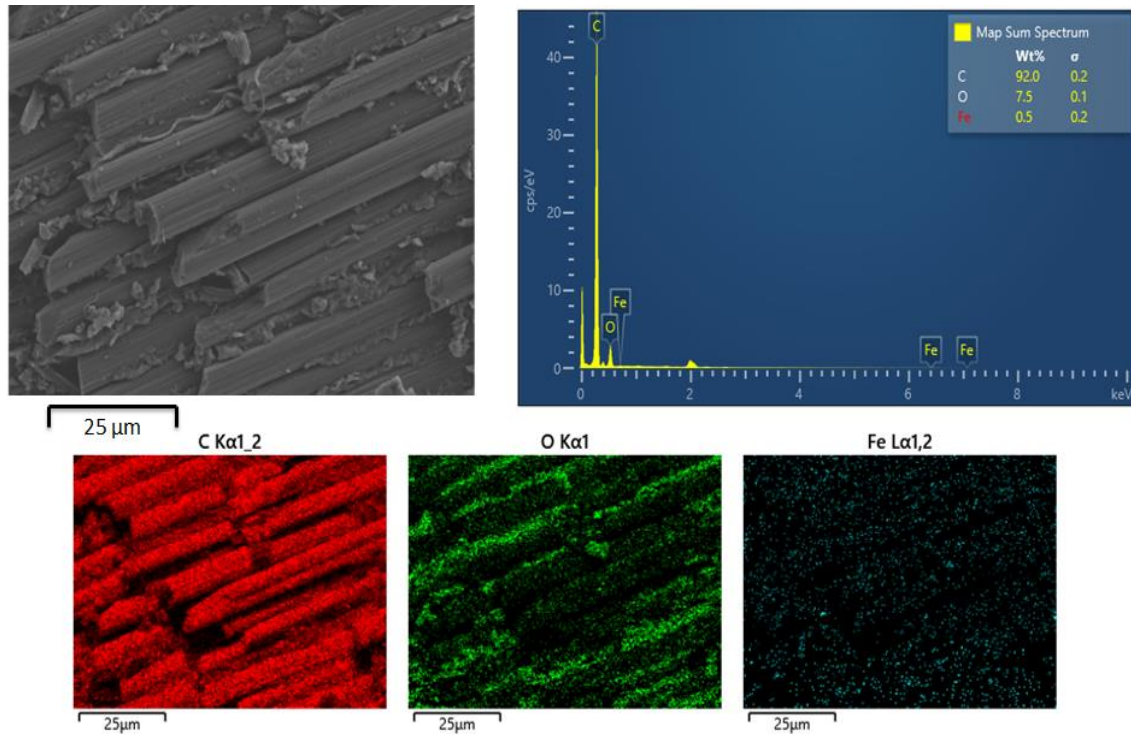
Ball-on disk üzerinde aşınma testleri yapıldıktan sonra, saf ve HNT katkıli kompozitlerin aşınmış yüzeyleri, aşınma mekanizmalarını ve hasarlarını belirlemek için SEM görüntüleri kullanılarak incelenmiştir. 10 N aşınma yükü altında saf karbon-aramid kompozitlerin (Şekil 4.10. a, c, e, g) ve %2 HNT katkıli karbon-aramid nano kompozitlerin (Şekil 4.10. b, d, f, h) aşınmış yüzeyleri Şekil 4.10'da gösterilmiştir. Her iki numunede de abrazif aşınma mekanizması baskın olmasına rağmen, gözle görülür farklılıklar görülmüştür. Aşındırıcı çelik bilye, ball-on disk aşınma testi gerçekleştirirken ilk olarak epoksi matrise zarar vermiştir. Ancak, matrisin tamamı ve birinci fiber katmanındaki tüm fiberler saf kompozitin yüzeyinde kırılmıştır (Şekil 4.10. a). Karbon-aramid elyaflar ve matrislerin yüksek oranda hasarlandığı ve matris kırılması, elyaf-matris bağlarının ayrılması, lif kırılmasının yaşandığı gözlenmiştir (Şekil 4.10. c). Matris-elyaf arayüzeyinde katmanların ayrılmasına bağlı olarak elyaf kopması da tespit edilmiştir. Abrazif aşınma kalıntısı, HNT katkıli olanlara göre saf kompozitlerde daha yüksektir (Şekil 4.10. e). %2 HNT içeren kompozit, tribolojik testlerde daha iyi performans göstermiş ve HNT katkıli kompozitlerin SEM görüntüleri (Şekil 4.10. b, d, f, h) verilmiştir.

Aşındırıcı çelik bilye, HNT katkıli numunelerde bütün matrisi ortadan kaldıramamıştır (Şekil 4.10. b). Bunun sonucunda, bazı fiberler zarara uğramış ve bazı fiberlerde matrisler tarafında kaplanmaya devam etmiştir. Bu yüzden, HNT'lerin kompozit yüzeyler üzerinde katı yağlayıcı film gibi davrandığı ve temas bölgesi üzerindeki aşınma hasarını azalttığı görülmüştür. Karbon-aramid elyaflar ile epoksi matris arasındaki etkileşim, matrislerdeki HNT'lerin iyi dağılımından dolayı artmıştır (Şekil 4.10. f, h). Kompozitlere %2 HNT katkısı, matris-elyaf arayüz direncini iyileştirmiş, aynı zamanda güçlü bir matris-elyaf arayüzü sağlamış, matris kırılmasını ve çatlamasını, elyaf kırılmasını ve kopmalarını önlemiştir. HNT ve matris arayüzünü SEM görüntülerinden görmek mümkündür. Saf ve %2 HNT katkıli numunelerin SEM görüntüleri, 30000 kat büyüme (Şekil 4.10. g, h) ile karşılaştırılmıştır. Epoksi ile kaplanmış HNT'ler, matris ve elyaf-matris arayüzüne gömülü olarak görülmektedir. Elyaf-matris arayüzündeki takviye edilmiş HNT'ler, nanotüp köprüleme etkisi ile katmanlar arası özellikleri etkilemekte ve aşınma testleri sırasında güçlü bir elyaf-matris arayüzü ile hasar ilerlemesini geciktirmiştir. SEM görüntüleri, karbon-aramid katkıli hibrit kompozitlerin tribolojik özellikleri üzerinde HNT'lerin mukavemetlendirme mekanizmasını ortaya çıkarmaktadır.

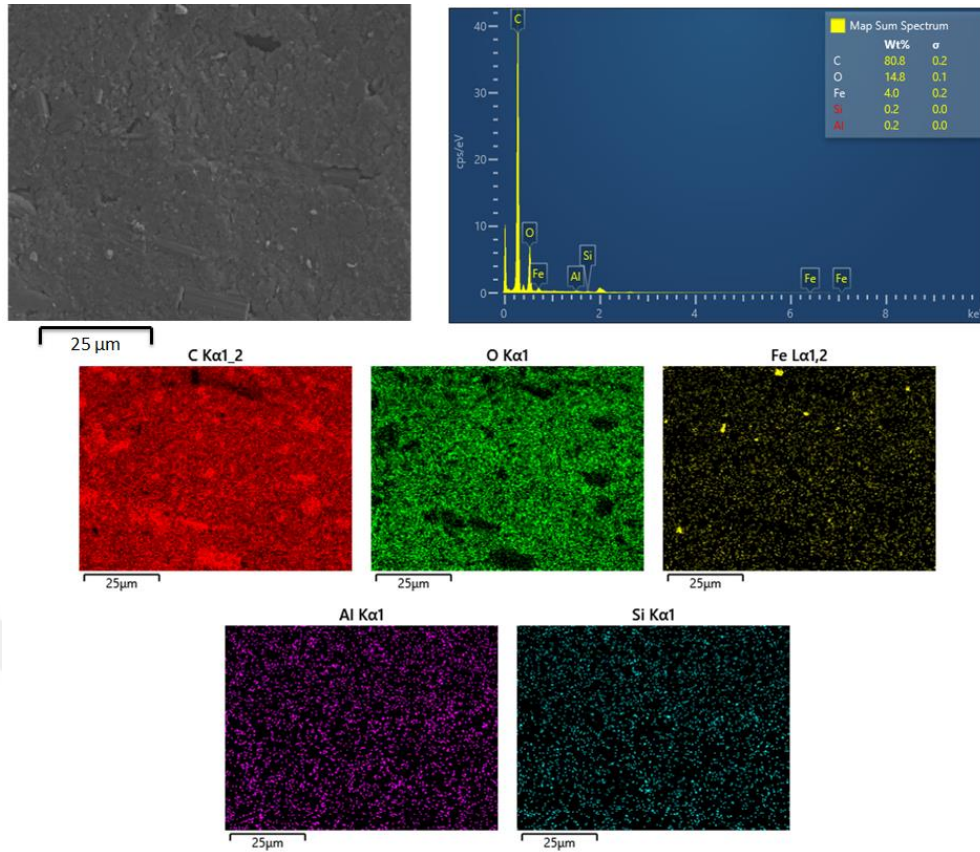


Şekil 4.10. 10 N aşınma yükü altında saf karbon-aramid kompozitlerin (Şekil 4.10. a, c, e, g) ve %2 HNT katkıli karbon-aramid nanokompozitlerin (Şekil 4.10. b, d, f, h) aşınmış yüzeyleri

Saf ve HNT katkıli kompozitlerin yüzeyleri, ball-on-disk aşınma testlerinden sonra EDX ile değerlendirilmiştir (Şekil 4.11 ve Şekil 4.12). EDX sonuçları, kayma aşınması sırasında kompozit yüzeyler üzerinde meydana gelen temel çökelmeyi incelemeye yardımcı olur. Ayrıca, EDX temel haritaları kompozit yüzey üzerindeki HNT'lerin dağılımını göstermektedir. HNT'lerin epoksi matris içerisinde geliş güzel savrulduğu ve iyi dağıtıldığı görülmektedir. HNT'ler epoksiyi daha dayanıklı yapar (Tang ve ark., 2011), katı parçacıklar gibi davranır, çatlak sabitlemesi ve desteklemesi yoluyla aşınma hasarını azaltmaya yardım eder (Ulus, Kaybal ve ark., 2021). Saf kompozitin EDX sonuçları, aşınmış yüzeylerin abrazif aşınmanın varlığını kanıtladığını göstermiştir. EDX görüntüsüne göre HNT katkıli nanokompozitin aşınmış yüzeyinde kütlece %80.8 C, %14.8 O, %4 Fe, %0.2 Al ve %0.2 silikon ortaya çıkmıştır. Ayrıca, saf nanokompozitin aşınmış yüzeyinde ise kütlece %92 C, %7.5 O ve %0.5 Fe ortaya çıkmıştır. EDX haritası, karbon-aramid nanokompozitlerin sürtünme ve aşınma mekanizması üzerinde, HNT'lerin etkisini gösteren tribofilm morfolojisini ve element dağılımını göstermektedir. Silikon, alüminyum ve bu iki malzemenin EDX haritaları, tribofilm katmanları olarak aşınmış yüzeylerde HNT'lerin varlığını kanıtlar. Bu nedenle, aşınma temas yüzeyi üzerinde katı bir yağlayıcı gibi davranan HNT'lerin varlığı, kompozitin aşınma özelliklerini belirgin şekilde değiştirmiştir.



Şekil 4.11. Saf karbon-aramid kompozit numunelerin SEM ve EDX analizleri



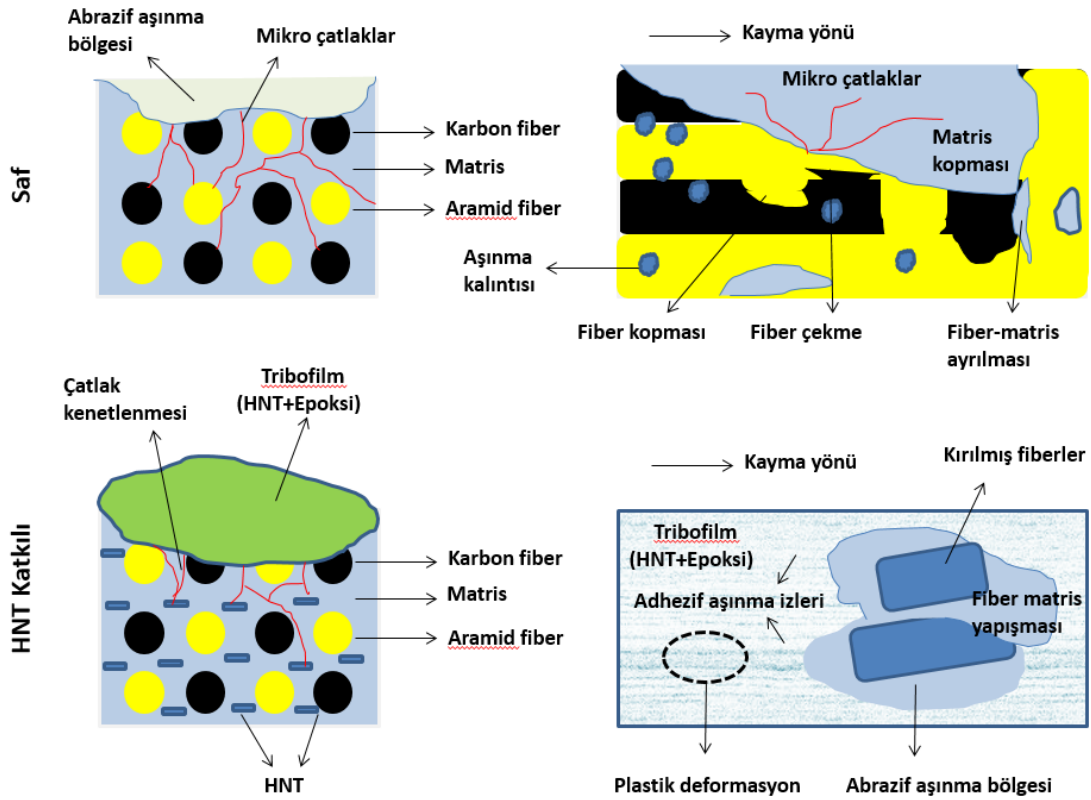
Şekil 4.12. %2 HNT katkılı nanokompozit numunelerin SEM ve EDX analizleri

4.2. Kuru Kaymalı Aşınma Mekanizması

Saf ve HNT katkılı karbon-aramid hibrit kompozitlerdeki aşınma mekanizmaları, Şekil 4.13'de şematik olarak gösterilmiştir. Kaymalı aşınma yolu, aşındırıcı çelik bilyenin temasıyla oluşturulmuştur. Aşınma izleri, aşınma testleri sırasında aşınma yolu üzerinde görülür. Aşınma sonuçları, HNT katkısının aşınma miktarını ve sürtünme katsayısını düşürdüğünü, bu gelişmenin ana nedenlerinin de HNT'lerin katı yağlayıcı özellikleri ve iyi ısıl iletkenliği olduğunu gösterir. Saf kompozitler için baskın olan aşınma mekanizması abrazyiftir. Bu yüzden epoksi tabakasının hemen hemen tamamı, kaymalı yol üzerindeki aşındırıcı çelik bilye tarafından taşınır. Ardından, karbon-aramid hibrit kumaşın ilk tabakası bir aşındırıcı bilye tarafından zarar görür. Aşınma hasarı zaman içinde sonraki katmanları da etkilemiş ve temas bölgesinde mikro çatlaklar oluşturmuştur. Mikro çatlaklar iç yapı boyunca ilerler ve matris-elyaf ara yüzüne ulaşır, daha sonra matris-elyaf bağlarının ayrılmasına neden olur. Elyaf ayrılması, zayıf elyaf-matris arayüz direncinden dolayı oluşur. Parçalanmış karbon-aramid elyaflar ve epoksi matrisler, aşınma kalıntısı olarak görülmektedir (Şekil 4.13).

HNT katkılı nanokompozitlerin aşınma mekanizması, saf nanokompozitlerden farklıdır. Çelik bilyenin HNT katkılı karbon-aramid kompozit yüzey üzerinde kayması sırasında, HNT'leri kapsayan aşınma kalıntıları aşındırıcı çelik bilyeye yapışır. Daha sonra kayma yolu boyunca nanokompozit yüzey üzerine yapışır ve yüzeyde tribolojik etkileri azaltan bir tribofilm tabakası oluşturur (Muralidhara ve ark., 2020). Tribofilm tabakası, çelik bilye ile kompozit yüzey arayüzünde katı bir yağlayıcı gibi davranır, azaltılmış bir aşınma miktarına ve sürtünme katsayısına neden olur (Padhan ve ark., 2020). Sonuç olarak, HNT'ler temas bölgesindeki sürtünmeyi azaltan katı yağlayıcı etkiye sahiptir. Üstelik HNT'lerin iyi dağılmasının köprüleme etkisi yüzey altı çatlak yayılmasını engeller. Son olarak, HNT'ler geniş yüzey alanlarından ve boru şeklindeki oluşumlarından yola çıkarak güçlü bir elyaf-matris arayüz yapışması sağlarlar (Ulus, Kaybal ve ark., 2019). Bu sebeple, HNT katkılı nanokompozitler için baskın olan aşınma mekanizması, aşınmış yüzeyler üzerinde oluşan yollardır. Ancak, yüzey üzerinde katı tribofilm tabakasının ve HNT'lerle zengin tabakaların kalınlıkları değiştiği için, kayma esnasında elyaf kırılmasına neden olan abrazif aşınma mekanizması da görülmektedir.

Aynı zamanda HNT katkılı nanokompozitlerin aşınmış yüzey SEM görüntüleri (Şekil 4.12), aşınmış yüzeydeki tribofilmleri ve abrazif-adhezif aşınma mekanizmalarını doğrulamaktadır (Şekil 4.13).



Şekil 4.13. Aşınma mekanizması üzerinde HNT etkisinin şematik gösterimi

Temas yüzeyi sıcaklığı, aşınma mekanizmasının önemli parametrelerinden biridir. Temas bölgesindeki testler sırasında ortaya çıkan ısı, HNT katkılı nanokompozitin yüksek ısı iletkenliği boyunca hızlı ve eşit bir şekilde yüzeye aktarılabilir. Saf kompozitlerin temas bölgesinde ortaya çıkan ısı, nanoparçacıklardan yoksun olduğundan dolayı eşit bir şekilde dağılmaz. Bu yüzden saf numunelerin temas noktalarında daha yüksek sıcaklık değerleri görülmektedir. HNT katkısının temas bölgesi sıcaklığını 74 °C'den 68 °C'ye düşürdüğü ısı kamera görüntülerinde (Şekil 4.6) açıkça görülmektedir. Sıcaklık artışları, kompozit malzemenin aşınma performansını etkileyen basıncı ve temas alanını değiştirecektir. Karbon-aramid hibrit kompozit ile yağlanmamış çelik bilye arasındaki kaymalı aşınma işlemi esnasında, sürtünmeden oluşan ısının sonucunda kompozit ve aşındırıcı bilye temas yüzeylerinde sıcaklık artışları gerçekleşir. Tribofilme şekil veren HNT'lerin katı yağlayıcı özellikleri ve iyi ısı iletkenlikleri, kompozitten yapılan ısı transferini artırır. Bu yüzden daha düşük temas bölgesi sıcaklıkları, HNT katkılı nanokompozitlerin aşınma miktarındaki ve ağırlık kaybındaki düşüşü tetikler.

4.3. Mekanik Performans

Daha önceki bir çalışmada (Çetin ve ark., 2021), dondurucu ve ılık sıcaklık koşullarında HNT yüklü ve saf karbon-aramid hibrit nanokompozitler üzerinde yarı statik penetrasyon testleri gerçekleştirdiler. Karbon-aramid nanokompozitlerin penetrasyon direncinin ve enerji soğurma kabiliyetinin HNT katkısı ile arttığını tespit ettiler. Bu çalışmada, karbon-aramid hibrit kumaşlar, matrisler, HNT'ler kullanılmış ve mekanik performansdaki artış, aşınma performansına ilave olarak kanıtlanmıştır.

Ayrıca saf ve HNT katkılı kompozitlerin sertlik özellikleri, ASTM: D785-08 standardına göre Brinell sertlik testi kullanılarak incelenmiştir (Subramanian ve ark., 2022). Brinell sertlik testleri 2.5 mm çapında bir karbür bilye kullanılarak 1 kg'lık bir yük ile gerçekleştirilmiştir. Her numune üzerinde farklı yerlerde olmak üzere en az 20 çentik uygulanmış ve ortalama değerler Brinell sertliği olarak kabul edilmiştir. Saf ve HNT katkılı kompozitlerin sertliği yaklaşık olarak sırasıyla $0,55 \pm 0,015$ GPa ve $0,61 \pm 0,013$ GPa'dır. Karbon-aramid hibrit kompozitin sertliği, epoksi matris içerisine HNT ilavesiyle arttırılmıştır. HNT ilavesinden sonra sertlikte meydana gelen bu artış, kompozitlerin sertliğini artıran (Devireddy & Biswas, 2017) HNT katkısı ile kompozitlerin mukavemetlerinde ki iyileşmeye bağlanabilir.

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada, karbon-aramid elyaf takviyeli hibrit kompozitlerin aşınma davranışı üzerindeki HNT katkısı incelenmiştir. Saf ve HNT katkılı kompozitler, vakum destekli el yatırma yöntemi kullanılarak üretilmiştir. Sürtünme katsayısı, aşınma hızı, sıcaklık ve yüzey pürüzlülüğü üzerinde HNT'lerin etkileri analiz edilmiştir. Ayrıca kompozitlerin aşınma mekanizması üzerinde HNT'lerin etkisi de 3 boyutlu topoğrafya, ısı kamera, EDX ve SEM görüntüleri ile detaylı olarak incelenmiştir.

Karbon-aramid elyaf kompozitlerin tribolojik özellikleri, matriste HNT'lerin homojen dağılımı ile geliştirilmiştir. Gelişmiş aşınma özellikleri, nanokompozitlere %2 HNT katkısıyla elde edilmiştir. HNT'ler, karbon-aramid elyaflar ile matris arasındaki etkileşimi geliştirerek matris-elyaf arayüz direncini arttırmıştır. Buna ek olarak ısı kamera görüntüleri incelendiğinde, HNT'ler aşınma temas alanından ısı transferini arttırmıştır. Böylece HNT katkısının, kompozitlerin ısı iletkenliğini ve kararlılığını arttırdığı görülmüştür. Ayrıca, HNT takviyesi ile aşınma miktarı ve sürtünme katsayısı azalmıştır. Örneğin %2 HNT katkısı, 10 N normal yükte aşınma miktarını ve sürtünme katsayısını sırasıyla %75 ve %11 iyileştirmiştir.

Aşınma yükü 10 N ve 15 N'den 20 N'ye yükseldiğinde, azalan aşınma miktarından dolayı HNT'lerin kompozitin yüzey kalitesini artırdığı görülmüştür. SEM ve EDX görüntüleri, karbon-aramid hibrit nanokompozitlerin aşınma özelliklerindeki iyileşmeyi ortaya çıkarmıştır. Arttırılmış tribolojik özelliklerin ana nedenlerinin, geliştirilmiş matris-elyaf arayüz direnci ve aşınma yüzeylerinde HNT'ler tarafından oluşturulan katı yağlayıcı film olduğu belirlenmiştir.

6. KAYNAKLAR

- Barari, B., Ellingham, T. K., Qamhia, I., Pillai, K. M., El-Hajjar, R., Turng, L. S., & Sabo, R. (2016). Mechanical characterization of scalable cellulose nano-fiber based composites made using liquid composite molding process. *Composites Part B: Engineering*, 84, 277-284.
- Bertolino, V., Cavallaro, G., Milioto, S., & Lazzara, G. (2020). Polysaccharides/Halloysite nanotubes for smart bionanocomposite materials. *Carbohydrate polymers*, 245, 116502.
- Buruga, K., & Kalathi, J. T. (2018). A facile synthesis of halloysite nanotubes based polymer nanocomposites for glass coating application. *Journal of Alloys and Compounds*, 735, 1807-1817.
- Cavallaro, G., Chiappisi, L., Pasbakhsh, P., Gradzielski, M., & Lazzara, G. (2018). A structural comparison of halloysite nanotubes of different origin by Small-Angle Neutron Scattering (SANS) and Electric Birefringence. *Applied Clay Science*, 160, 71-80.
- Camargo, P. H. C., Satyanarayana, K. G. ve Wypych, F., 2009, Nanocomposites: synthesis, structure, properties and new application opportunities, *Materials Research*, 12, 1-39.
- Campbell, F. C., 2004b, Chapter 10 - Thermoplastic Composites: An Unfulfilled Promise, In: *Manufacturing Processes for Advanced Composites*, Eds: Campbell, F. C., Amsterdam: Elsevier Science, p. 357-397.
- Çetin, M. E., Tatar, A. C., Demir, O., Önal, G., & Avcı, A. (2021). Effects of cryogenic and warm temperatures on quasi-static penetration resistance of carbon-aramid hybrid nanocomposites reinforced using halloysite nanotubes. *Mechanics of Materials*, 155, 103780.
- Çetiner, D., 2019. Halloysit katkılı biyoyumlu PCL/PEO kompozit nanolif sentezi ve biyomedikal uygulamaları (Master's thesis, Fen Bilimleri Enstitüsü)
- Dasari, A., Lim, S. H., Yu, Z. Z., & Mai, Y. W. (2007). Toughening, thermal stability, flame retardancy, and scratch-wear resistance of polymer-clay nanocomposites. *Australian journal of chemistry*, 60(7), 496-518.
- Demirsöz, R., 2018. "Granül Cüruf Taşımada Kullanılan Boruların İç Yüzeyinin Aşınma Özelliklerinin İyileştirilmesi", Karabük Üniversitesi.
- Devireddy, S. B. R., & Biswas, S. (2017). Physical and mechanical behavior of unidirectional banana/jute fiber reinforced epoxy based hybrid composites. *Polymer composites*, 38(7), 1396-1403.
- Du, M., Guo, B., & Jia, D. (2010). Newly emerging applications of halloysite nanotubes: a review. *Polymer International*, 59(5), 574-582.
- Durgun, İ., & Vatansever, O., 2013. Vakum torbalama yöntemi ile karbon fiber parça üretimi.
- Fragassa, C., 2017, Marine Applications of Natural Fibre-Reinforced Composites: A Manufacturing Case Study, In, Eds, p. 21-47.

- Gaaz, T. S., Sulong, A. B., Kadhum, A. A. H., Al-Amiery, A. A., Nassir, M. H., & Jaaz, A. H. (2017). The impact of halloysite on the thermo-mechanical properties of polymer composites. *Molecules*, 22(5), 838.
- Gülmez, S., 2018. Otomotiv endüstrisinde kullanılan polimer matrisli kompozit malzemeler.
- Habiba, K., Makarov, V. I., Weiner, B. R., & Morell, G., 2014. Fabrication of Nanomaterials by Pulsed Laser Synthesis. 30.
- Hahn, H. T., Tsai, S. W., 1980. Introduction to composite materials (Vol. 1): CRC Press
- Hull D., Clyne T.W., An Introduction to Composite Materials, Cambridge University Press. Macmillan, New York, A.B.D.,1981.
- İnce, E. (2014). Amfibi zırhlı araçlar için kompozit-alüminyum denge plakası tasarımı, sonlu elemanlar analizi ve üretimi (Master's thesis, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Kakisawa, H., Honda, K., & Kagawa, Y. (2000). Effect of wear on interface frictional resistance in fiber-reinforced composite: model experimental. *Materials Science and Engineering: A*, 284(1-2), 226-234.
- Karol, H. B., & Ürkmez Taşkın, N., 2019. Farklı takviye malzemeleri ilave edilmiş karbon fiber kompozit malzemelerin mekanik davranışlarının analiz edilmesi (Master's thesis, Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Kaya, A. İ. (2016). Kompozit malzemeler ve özellikleri. *Putech & Composite Poliüretan ve Kompozit Sanayi Dergisi*, 29, 38-45.
- Kaya, A.İ. (1995). Atık Kâğıtlardan Geri Kazanılmış Liflerden Kompozit Malzeme Üretim Olanaklarının Araştırılması, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, (Doktora tezi), sparta, 239s
- Kaybal, H. B., Ulus, H., Eskizeybek, V., & Avcı, A. (2021). An experimental study on low velocity impact performance of bolted composite joints part 1: Influence of halloysite nanotubes on dynamic loading response. *Composite Structures*, 258, 113415.
- Kovaříková, I., Szewczyková, B., Blaškoviš, P., Hodulova, E., & Lechovič, E., 2009. Study and characteristic of abrasive wear mechanisms. *Materials Science and Technology*, 1, 1-8.
- Ku, H., Wang, H., Pattarachaiyakoop, N., & Trada, M. (2011). A review on the tensile properties of natural fiber reinforced polymer composites. *Composites Part B: Engineering*, 42(4), 856-873.
- Kubade, P. and Kshirsagar, R., 2015. Current Research Trends in Modification/Interaction of Halloysite Nanotube Filled Polymer Blends and Its Composites : A Review. *International Journal of Science and Research (IJSR)*, 4(12), 1766–1772.
- Lagashetty, A. ve Venkataraman, A., 2005, Polymer nanocomposites, *Resonance*, 10 (7), 49-57.
- Liu, M., Jia, Z., Jia, D., and Zhou, C., 2014. “Progress in Polymer Science Recent Advance in Research on Halloysite Nanotubes-Polymer Nanocomposite,” *Progress in Polymer Science*, 39(8), 1498–1525.

- Lisuzzo, L., Caruso, M. R., Cavallaro, G., Milioto, S., & Lazzara, G. (2021). Hydroxypropyl cellulose films filled with halloysite nanotubes/wax hybrid microspheres. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 60(4), 1656-1665.
- Lisuzzo, L., Cavallaro, G., Milioto, S., & Lazzara, G. (2021). Halloysite nanotubes filled with MgO for paper reinforcement and deacidification. *Applied Clay Science*, 213, 106231.
- Loh XJ, Peh P, Liao S, Sng C, Li J, 2010. Controlled drug release from biodegradable thermoresponsive physical hydrogel nanofiber. *Journal of Controlled Release*, 143: 175-182.
- Ma, X., Scarpa, F., Peng, H.X., Allegri, G., Yuan, J., Ciobanu, R. 2015. Design of a hybrid carbon fibre/carbon nanotube composite for enhanced lightning strike resistance, *Aerosp. Sci. Technol.*
- Ma, Z., Wang, J., Gao, X., Ding, T., & Qin, Y. (2012). Application of halloysite nanotubes. *Progress in Chemistry*, 24(0203), 275.
- Mazumdar, S., 2002. *Composites Manufacturing: Materials, Product, and Process Engineering*. A.B.D.: CRC
- Mo, H., Yang, K., Li, S., & Jiang, P. (2016). High thermal conductivity and high impact strength of epoxy nanodielectrics with functionalized halloysite nanotubes. *RSC advances*, 6(73), 69569-69579.
- Mohammed, A., & Abdullah, A. (2018, November). Scanning electron microscopy (SEM): A review. In *Proceedings of the 2018 International Conference on Hydraulics and Pneumatics—HERVEX, Băile Govora, Romania* (pp. 7-9).
- Muralidhara, B., Babu, S. K., Hemanth, G., & Suresha, B. (2020). Optimization of abrasive wear behaviour of halloysite nanotubes filled carbon fabric reinforced epoxy hybrid composites. *Surface Topography: Metrology and Properties*, 8(4), 045028.
- Okka, M. A., 2019. Karbon nano tüp ve bor nitrür nano partikül takviyeli karbon/epoksi nanokompozitlerin aşınmaya etkisinin deneysel incelenmesi ve matematiksel modellenmesi.
- Öztürk, B., Arslan, F., & Öztürk, S. (2007). Hot wear properties of ceramic and basalt fiber reinforced hybrid friction materials. *Tribology International*, 40(1), 37-48.
- Qu, J. (1993). The effect of slightly weakened interfaces on the overall elastic properties of composite materials. *Mechanics of Materials*, 14(4), 269-281.
- Padhan, M., Marathe, U., & Bijwe, J. (2020). Surface topography modification, Film transfer and Wear mechanism for fibre reinforced polymer composites—An Overview. *Surface Topography: Metrology and Properties*, 8(4), 043002.
- Pal, P., Kundu, M. K., Kalra, S., & Das, C. K. (2012). Mechanical and crystalline behavior of polymeric nanocomposites in presence of natural clay. *Open Journal of Applied Sciences*, 2(4), 277-282.
- Peña-Parás, L., Maldonado-Cortés, D., García, P., Irigoyen, M., Taha-Tijerina, J., & Guerra, J. (2017). Tribological performance of halloysite clay nanotubes as green lubricant additives. *Wear*, 376, 885-892.

- Pei, G. X., Liu, X. Y., Wang, A., Lee, A. F., Isaacs, M. A., Li, L., ... & Zhang, T. (2015). Ag alloyed Pd single-atom catalysts for efficient selective hydrogenation of acetylene to ethylene in excess ethylene. *Acs Catalysis*, 5(6), 3717-3725.
- Puggal, S., Dhall, N., Singh, N. ve Singh Litt, M., 2016, A Review on Polymer Nanocomposites: Synthesis, Characterization and Mechanical Prop, p.
- Rosato, D. V., 1997. Designing with reinforced composites: Hanser Gardner Publications
- Rosas-Aburto, A., Gabaldón-Saucedo, I.A., Espinosa-Magaña, F., Ochoa-Lara, M.T., Roquero-Tejeda, P., Hernández-Luna, M., and Revilla-Vázquez, J. 2015. "Intercalation of poly(3, 4-ethylenedioxythiophene) within halloysite nanotubes: Synthesis of composites with improved thermal and electrical properties," *Microporous Mesoporous Materials*, 218, 118–129.
- Rozhina, E., Batasheva, S., Miftakhova, R., Yan, X., Vikulina, A., Volodkin, D., & Fakhrullin, R. (2021). Comparative cytotoxicity of kaolinite, halloysite, multiwalled carbon nanotubes and graphene oxide. *Applied Clay Science*, 205, 106041.
- Salamanca-Buentello, F., Persad, D. L., Court, E. B., Martin, D. K., Daar, A. S. and Singer, P. A., 2005. Nanotechnology and the developing world, *Plos Medicine*, 2(5), 383–386.
- Sepur, S., 2008. Nanotechnology: Technical Basics and Applications. Vincentz Network GmbH & Co KG.
- Sims, G. D. ve Broughton, W. R., 2000, 2.05 - Glass Fiber Reinforced Plastics— Properties, In: *Comprehensive Composite Materials*, Eds: Kelly, A. ve Zweben, C., Oxford: Pergamon, p. 151-197.
- Strong, A. B., 2008. Fundamentals of composites manufacturing: materials, methods and applications. Society of manufacturing engineers
- Subramanian, K., Ramasubramanian, S., Selvam, B., & Rajaram, P. (2022). Investigations on effectiveness of transfer layer on specific wear rate and coefficient of friction during dry sliding of hybrid polymer matrix composites. *Polymer Composites*.
- Subramani, K. and Ahmed, W., 2012. Nanotechnology and the Future of Dentistry, *Emerging Nanotechnologies in Dendistry*, 1-14.
- Sukur, E. F., Onal, G. *Wear* 2020, 460–461, 203481.
- Şükür, E. F. (2019). Korozif ortamın grafen katkılı bazalt/epoksi nanokompozitlerin mekanik ve aşınma özelliklerine etkisi.
- Şahin, Y., 2000. "Kompozit Malzemelere Giriş", *Gazi Kitabevi, Ankara*, 1-16, 37-41, 65-68, 79-88.
- Tang, Y., Deng, S., Ye, L., Yang, C., Yuan, Q., Zhang, J., & Zhao, C. (2011). Effects of unfolded and intercalated halloysites on mechanical properties of halloysite–epoxy nanocomposites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 42(4), 345-354.
- Tas, C. E., Hendessi, S., Baysal, M., Unal, S., Cebeci, F. C., Menciloglu, Y. Z., & Unal, H. (2017). Halloysite nanotubes/polyethylene nanocomposites for active food packaging

- materials with ethylene scavenging and gas barrier properties. *Food and Bioprocess Technology*, 10(4), 789-798.
- Thakur, V. K., Thakur, M. K., & Gupta, R. K. (2014). Raw natural fiber-based polymer composites. *International Journal of Polymer Analysis and Characterization*, 19(3), 256-271.
- Turp, O., 2019. Serbest radikal fotopolimerizasyon ile halloysit içeren termoset nanokompozitlerin hazırlanması (Master's thesis, Fen Bilimleri Enstitüsü)
- Ulus, H., Kaybal, H. B., Eskizeybek, V., & Avcı, A. (2019). Enhanced salty water durability of halloysite nanotube reinforced epoxy/basalt fiber hybrid composites. *Fibers and Polymers*, 20(10), 2184-2199.
- Ulus, H., Kaybal, H. B., Eskizeybek, V., & Avcı, A. (2021). Significantly improved shear, dynamic-mechanical, and mode II fracture performance of seawater aged basalt/epoxy composites: The impact of halloysite nanotube reinforcement. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 24(4), 1005-1014.
- Unterweger, C., Brüggemann, O., & Fürst, C. (2014). Synthetic fibers and thermoplastic short-fiber-reinforced polymers: Properties and characterization. *Polymer Composites*, 35(2), 227-236.
- Upadhyay, R. K., & Kumar, A. (2018). A novel approach to minimize dry sliding friction and wear behavior of epoxy by infusing fullerene C70 and multiwalled carbon nanotubes. *Tribology International*, 120, 455-464.
- Uzanalioğlu, H. (2021). Harçlarda karbon fiber oran ve boyutlarının elektriksel iletkenliğe etkisinin araştırılması (Doctoral dissertation, Kastamonu Üniversitesi).
- Ünal O., Yapı Malzemeleri Ders Notları, 6. Bölüm Kompozit Malzemeler, Afyon Kocatepe Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Yapı Öğretmenliği.
- Walock, M., 2012. Nanocomposite coatings based on quaternary metal-nitrogen and nanocarbon systems.
- Warren C.D., 2011. Low cost carbon fiber overview. Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee, A.B.D.
- Yaman, N., Öktem, T., & Seventekin, N. (2006). Karbon liflerinin üretimi. *Tekstil ve Konfeksiyon*, 16(3), 164-173.
- Yang, Y., Chen, Y., Leng, F., Huang, L., Wang, Z., & Tian, W. (2017). Recent advances on surface modification of halloysite nanotubes for multifunctional applications. *Applied Sciences*, 7(12), 1215.