

Nano Katkıların Polimerlerin Sürtünme Katsayısına Etkisi

Alim Kaştan¹, Yılmaz Yalçın², Şükrü Talaş²

¹*Antalya OSB Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesi, Antalya*

²*Afyon Kocatepe Ün. Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, Afyonkarahisar*

e-posta: kastanalim@gmail.com

Özet

Anahtar kelimeler

Polimer; nanokatıklar;
sürtünme katsayısı

Polimerlerin teknik özelliklerini geliştirerek servis ömürlerini uzatmak için nano malzemeler gelecek ve teknolojik gelişmeler açısından oldukça büyük öneme sahiptir. Çünkü genel olarak malzemelerin nano boyuttaki özellikleri ile makro boyuttaki özellikleri değişiklik göstermektedir. Bundan dolayı, katkı malzemelerinin matrise ilavesinde boyutlar önemlidir. Son yıllarda, polimer esaslı nanokompozitler ile ilgili çalışmalar ve bunların endüstriyel kullanım alanları, artan bir şekilde ilerleme göstermektedir. Bu derleme çalışmasında polimer malzemelere ilave edilen nanopartiküllerin sürtünme katsayısına etkisi güncel yayınlar taranarak araştırılmıştır.

The Effect of Nano Additives on The Friction Coefficient of Polymers

Abstract

Keywords

Polymer, nanoadditions,
friction coefficient

Nano materials have a very great importance for the future technological developments and also to extend the service life by improving the mechanical properties of the polymer nanomaterials. Because, the properties in nanoscale, in general, varies from the characteristics of the material properties of the macro dimensions. Thus, size of the additives to be added to the matrix it is important. In recent years, studies related to polymer-based nanocomposites and their industrial uses are increasingly progressing. This review study investigates the effects of nanoparticles in the polymer material on the friction coefficient by scanning recent publications.

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

1 GİRİŞ

Endüstride meydana gelen gelişmelere bağlı olarak, geleneksel malzemeler tek başlarına teknolojinin ihtiyaçlarını karşılayamaz hale gelmiştir. Buna bağlı olarak, 1900'lü yılların ikinci yarısından günümüze, kompozit malzemelerin üretimi ve elde edilen malzemelerin özellikleri üzerinde araştırma ve geliştirme faaliyetleri artarak devam etmektedir. Özellikle havacılık, askeri uygulama alanları, otomotiv ve denizcilik endüstrisinde hafif ve dayanıklı malzemelere duyulan ihtiyaç, bu araştırmalar için önemli bir itici güç oluşturmaktadır. Yüksek sıcaklık dayanımı ve boyutsal kararlılığa olan gereksinim, kompozit

malzemelerin geliştirilmesinde önemli birer etken olmaktadır (1). Kompozit malzemeler, tek bir

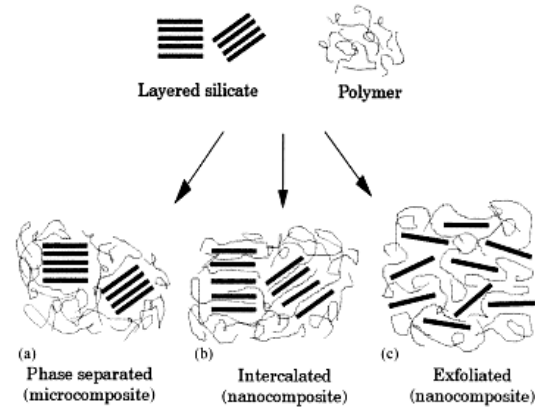
malzeme özelliği gösteren ancak kimyasal olarak birbirinden farklı, iki veya daha fazla bileşenden oluşan malzemelerdir. Kompozit malzemelerin üretilmesiyle, kompozit malzemeyi oluşturan malzemelerin her biri tek başına kullanıldığında elde edilemeyen bazı özellikleri elde etmek mümkün olmaktadır. Böylece hedeflenen uygulama alanı için gerekli olan özelliklere sahip yeni bir malzemenin tasarlanması ve üretimi mümkün olmaktadır (2). Genel olarak, sürtünme, temasta olan ve izafi hareket eden iki cismin temas

yüzeylerinin harekete veya hareket ihtimaline karşı gösterdikleri direnç olarak tarif edilir. Bir cisim diğer bir cisim üzerinde kayarken birbirlerine kayma yüzeyine paralel bir kuvvet uygularlar. Bu kuvvet sürtünme kuvveti olarak tanımlanır. Sürtünme katsayısı ise yanal kuvvetin (F_s), normal (F_n) kuvvete oranı olarak ifade edilir [3]. Polimerlerin sürtünmesi ile oluşan aşınma mekanizmaları abrasiv, adheziv ve yorulma aşınmasıdır (4,5). Abrasiv aşınma sert parçaların veya pürüzlü yüzeylerin, polimerden küçük parçacıkları kaldırması ile oluşur. Adheziv aşınma polimerin aşındığı karşı yüzeye yapışması ile oluşur. Bu aşınma ile yüzeyde bir film tabakası oluşur. Yorulma aşınması uzun süreli sürtünme sonucunda polimerin tekrarlanan deformasyonu ile yüzeyde çukur oluşumu sonucunda, çatlaklar oluşması ve bu çatlakların polimerden tabaka halinde kopması ile oluşur (6).

2 POLİMER NANOKOMPOZİTLER VE GENEL ÖZELLİKLERİ

Nanokompozit, nano boyutta yapı içeren kompozitlerdir (7). Polimer nanokompozit fikri ise ilk defa 1950 yılında ortaya atılmış, 1985 yılında ise Toyota araştırma grubunun poliamid-kil karışımları çalışmalarıyla ilerlemeler kaydetmiştir. Grubun o zamanki hedefi, metalden daha hafif ve ısıya dayanıklı otomobil aksamı malzemesi üretmekti. Günümüzde ise polimer nanokompozitler sanayinin her kesiminden ilgi görmektedir. Uygulama alanları da otomotivden paketlemeye, elektronik aletlerden ev aletlerine ve alev dayanıklı her çeşit ürüne uzanmaktadır (8). Polimerik nanokompozitler (PNC) genelde % 1–3 oranında nanopartikül içeren, tek bileşen ve tek faz gibi davranan materyallerdir. PNC'ler saydamlık, düşük yoğunluk, yanıcılığı azaltma, düşük geçirgenlik, mekanik özelliklerinin gelişimi gibi özellikler içerir (9). Matris içerisine katılan nanopartiküllerin şekli, boyutları ve oranı üretilen kompozitin özelliklerini etkiler (10). Nanokatki malzemeleri olarak genellikle karbon (örneğin; fulleren ve türevleri) (11–15), katmanlı kil mineralleri (16), nano boyutlu metaller ile organik ve inorganik mineraller kullanılır (17).

Nanokatkiğin geleneksel olarak mikro boyutta kullanılan katkılarına göre üstün özellikleri vardır (18–20). Bunlardan birincisi daha yüksek yüzey alanlarının matris ile etkileşimi arttırmasıdır. İkincisi mikro boyuttaki katkılarına göre daha az miktarda kullanılmasıdır. Bu sayede matris malzemesi; düşük ağırlık, süneklik, iyi işlenebilirlik vb. özelliklerini muhafaza eder. Üçüncüsü ise mikrokatkılara göre olumsuz etkilerinin daha az olmasıdır. Nanopartiküllerin malzeme içerisindeki dağılımı üretilen kompozitin özelliklerini direkt olarak etkiler. Üretim sırasında mümkün olduğu kadar nanopartiküllerin polimer içerisinde homojen olarak dağılması istenir. Ne yazık ki yüksek yüzey enerjilerinden dolayı nanopartikülleri polimer matris içerisinde homojen olarak dağıtmak zordur. Bu olumsuzluğu ortadan kaldırmak için ultrasonik vibrasyon, özel sol-jel ve yüksek enerji dispersiyon yöntemleri gibi teknikler kullanılmaktadır. Bu yöntemlerin içerisinde en çok kullanılan ultrasonik vibrasyon yöntemidir (21–28). Nanokil katkılı kompozitlerde, kil tabakalarının matris içerisinde ayrılarak düzgün bir şekilde dağılması yük altında homojen deformasyon ve yük dağılımını sağlaması açısından önemlidir. Şekil 1'de polimer/kil kompozitlerin şematik resmi görülmektedir.

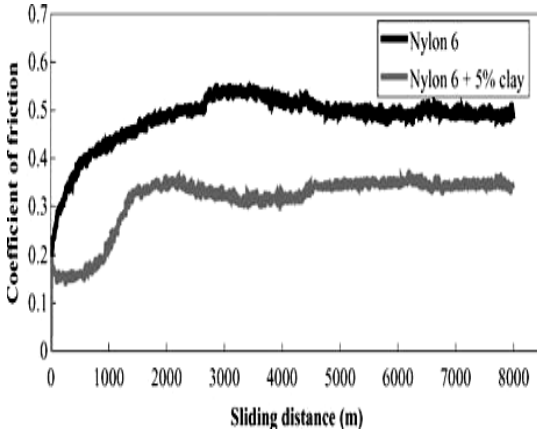


Şekil 1. Nanokillerin polimer içerisinde dağılımının şematik gösterimi (29).

3. Polimer Malzemelere İlave Edilen Nanokatkiğin Sürtünme Katsayısına Etkisi

3.1. Nanokil

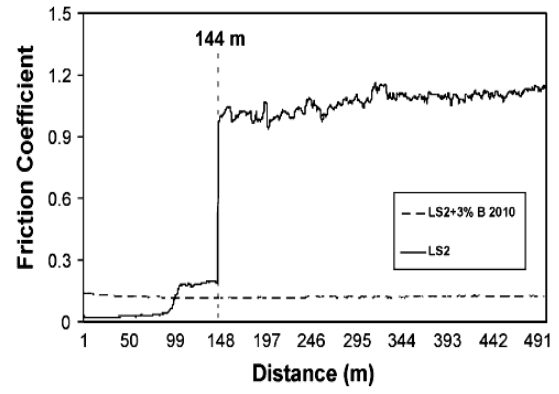
PA 6'ya modifiye edilmiş %5 montmorillonit katarak oluşturulan kompozitin pin-on-disk cihazında yapılan deneyler sonucunda % 5 nanokil katkısının sürtünme katsayısını 0,5'ten 0,35'e azalttığı tespit edilmiştir (Şekil 2). Ayrıca hem katkısız hem katkılı PA6 malzemesinin sürtünme katsayısı artan yük ile benzer davranışlar sergilemiştir. Sürtünme katsayısı tüm yüklerde artan kayma mesafesi ile önce artmakta sonra kararlı hale gelmektedir. Artan yük ile kararlı sürtünme katsayısı artmakta, kararlı hale geldiği mesafe ise kısalmaktadır (30). Aynı araştırmacılar bir diğer çalışmada (31) PA 6 matris malzemesine modifiye edilmiş montmorillonit (%1-3 oranlarında) ilavesinin sulu ortamdaki etkilerini incelemişlerdir. Nanokil miktarının artması ile sürtünme katsayısı azalmıştır.



Şekil 2. Sürtünme katsayısı-yol grafiği (hız: 0,4 m/s, yük: 60 N), (30).

Bu azalmanın aynı zamanda nanokil miktarının artması ile matristeki kristallenme oranının artmasından kaynaklandığını belirtmişlerdir. Katkısız ve katkılı bütün malzemelerde düşük yüklerde kuru sürtünme katsayısı daha düşük iken belli bir yükten sonra olay tersine dönmekte ve sulu ortamdaki sürtünme katsayısı düşmektedir. Bu geçişin artan nanokil yüzdesi ile daha yüksek yüklere kaydığını tespit etmişlerdir. Araştırmacılar, yüksek yüklerde sürtünme katsayısındaki düşüğe, polimer yüzeyinin su emmesinin neden olabileceğini ifade etmektedirler.

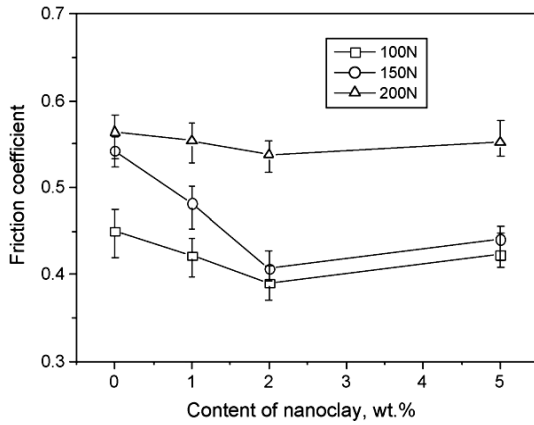
Polikarbonatın (LS2) içerisine %3 oranında organik olarak modifiye edilmiş montmorillonit ilavesiyle elde edilen (LS2+3% B 2010) nanokompozitin sürtünme katsayısının çok düşük seviyede ve kararlı olduğu tespit edilmiştir (32). Sürtünmedeki bu düşüş, kuru aşınma rejiminden yağlamalı aşınma rejimine geçişe eşdeğer görülmektedir. Bunun, ilave edilen nanokilin polikarbonatın bozunma sıcaklığını artırmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Ayrıca, Şekil 3'de görüldüğü gibi katkısız polikarbonatın sürtünme katsayısının başlangıçta düşük olmasına karşılık 144 m'den sonra ani bir yükseliş gösterdiği belirlenmiştir.



Şekil 3. Sürtünme katsayısı-yol grafiği (hız: 0,10 m s⁻¹ m/s, yük: 0,98 N),(32).

Bir başka çalışmada, matris malzeme olarak Poly vinylidene fluoride (PVDF) polimerine, %1, %2 ve %5 oranlarında organik modifiye edilmiş kil (Nanomer I.34TCN, Nanocor) ilavesinin etkileri incelenmiştir (33). Deneyin ilk 20 dakikasında, katkısız PVDF'nin sürtünme katsayısında bir artıştan sonra ani bir düşüş gözlemlenmiştir. 40 dakikadan sonra sürtünme katsayısı kararlı hale gelmiştir. Ancak PVDF'ye nanokil ilavesi ile ilk 20 dakikada sürtünme katsayısında artıştan sonra herhangi bir düşüş olmadan kararlı hale geçmiştir. Uygulanan tüm yüklerde nanokil katkısının PVDF'nin sürtünme katsayısını düşürdüğü ve en düşük değerlerin %2 nanokil katkısında elde edildiği belirlenmiştir (Şekil 4). Daha yüksek nanokil ilavesinin sürtünme katsayısını düşürme açısından zararlı olduğu görülmüştür. Diğer taraftan artan

yük ile sürtünme katsayısının arttığı kaydedilmiştir. Bu durumu nanokil ilavesi ile aşınma yüzeyindeki film tabakasının daha kolay oluşması, malzemenin plastik deformasyona karşı direncinin artması ve film tabakası ile aşınma yüzeyi arasındaki yapışma kuvvetinin artması olarak açıklamışlardır. Bu çalışmada, PA nanokompozitinde elde edilen aksine (31) artan nanokil oranı ile kristallenme oranının azaldığı tespit edilmiştir.



Şekil 4. Farklı oranlarda nanokil ilave edilmiş PVDF nanokompozitler ve PVDF'nin sürtünme katsayısının yükün etkisi (33).

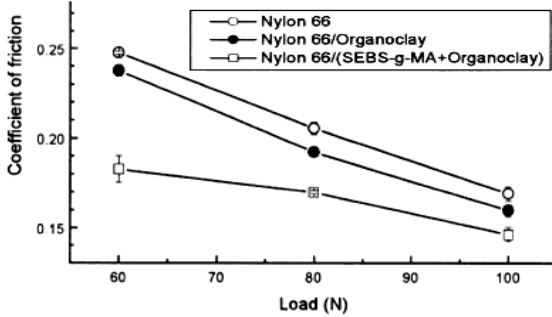
Kaştan (34) yaptığı tez çalışmasında, poliamid 6 (PA 6) matris malzemeye, yüksek yoğunluklu polietilen(HDPE), nanokil(NC) ve uyumlaştırıcı(C) MaleicAnhydride aşılınmış polietilenin (PE-g-MA) aşınma davranışlarına etkisini incelemiştir. Malzemelerin sürtünme katsayıları yükün artması ile azalmıştır. % 1 nanaokil ile sürtünme katsayısı değerleri azalış göstermiştir. Ancak yapıdaki nanokil oranının artması sürtünme katsayısı değerlerini arttırmıştır. Yapıya ilave edilen %5 uyumlaştırıcı ile sürtünme katsayısı katkısız malzemelere göre azalmıştır. Fakat uyumlaştırıcının % 10'a arttırılması ile sürtünme katsayısı da artmıştır. En düşük sürtünme katsayısı PA 6/HDPE/PE-gMA/Nanokil(80/20/5/1) kompozitinde ve 1m/s hızda gerçekleşmiştir. Üretilen kompozitlerin, sürtünme katsayısının kayma hızı ile olan ilişkisini belirlemek için yapılan deneyler sonucunda katkısız

HDPE hariç tüm malzemelerin, hızın artması ile sürtünme katsayılarının azaldığı görülmüştür. Hızın 1m/s'den 2m/s'ye çıkarılması sonucunda sürtünme katsayısındaki en fazla düşüş PA 6/HDPE/PE-g-MA/Nanokil (80/20/10/5) kompozitinde görülmüştür ve bu düşüş yaklaşık % 15 civarındadır. Malzemeye ilave edilen uyumlaştırıcı ve nanaokil sürtünme katsayısının kayma yolu boyunca daha kısa mesafede ve daha stabil hale gelmesine neden olmuştur. Bu durumun yapıya ilave edilen nanokilin disk yüzeyinde film tabakası oluşmasındaki pozitif etkisinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

Ultramid matris malzemesinin içerisine %1, %3 ve %5 oranlarında nanokilcolosite ilave ederek hazırlanan kompozitler üzerinde yapılan çalışmalar (35) % nanokatkinin ve deney süresinin değişmesi ile sürtünme kuvvetinin de değiştiğini göstermiştir. Yazarlar, nanokatkinin malzemenin aşınma bölgesinde oluşan ısınmayı düzenlediğini ve bu durumda malzemenin sürtünme kuvvetinde azalma olduğunu gözlemlemişlerdir. Çalışmada, ultramid/nano-kompozitlerde optimum nanokatki oranının %3 olduğunu tespit etmişlerdir.

Sirong vd. (36) naylon 66 matris malzemeye değişik oranlarda modifiye edilmiş nano boyutta organokil(colosite 30B) ve uyumlaştırıcı olarak maleik anhidrit aşılınmış Stiren-etilen (SEBS-g-MA) ilave ederek hazırlamış oldukları kompozitlerin aşınma davranışlarını incelemişlerdir. Üç değişik kompozit hazırlamışlar ve bu kompozitlerin kimyasal bileşimleri katkısız naylon 66, naylon 66/nanokil(80/20), naylon 66/ SEBS-g-MA/nanokil/ (80/15/5) şeklindedir. Şekil 5'de görüldüğü gibi sürtünme katsayısının en yüksek olduğu malzeme katkısız naylon 66'dır. Malzeme içerisine nanokil eklenmesi ile sürtünme katsayısı düşüş göstermiştir. En düşük sürtünme katsayısını ise naylon 66/ SEBS-g-MA/ nanokil kompozitinde elde etmişlerdir. Yani, yapıya ilave edilen uyumlaştırıcının sürtünme katsayısı üzerinde olumlu etkisi olduğu belirtilmiştir. Malzeme içerisine ilave edilen nanokilin ve uyumlaştırıcının

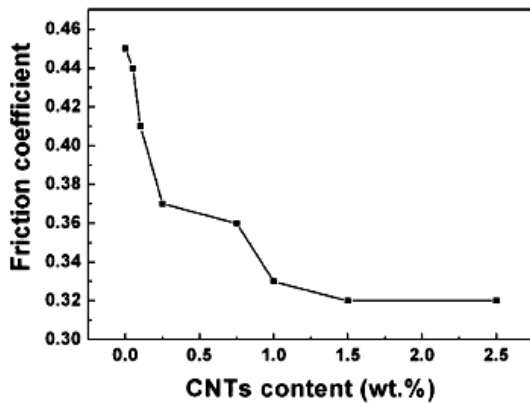
aşınma sırasında, yüzeydeki direnci arttırdığını ve disk yüzeyindeki koruyucu film tabakasına olumlu katkı sağladığını belirtmişlerdir. Ayrıca, ilave edilen nanokil ve uyumlaştırıcının sürtünme kuvvetini daha kararlı hale getirdiğini gözlemlemişlerdir.



Şekil 5. Sürtünme katsayısı- yük grafiği (36).

3.2. Karbon nanotüp

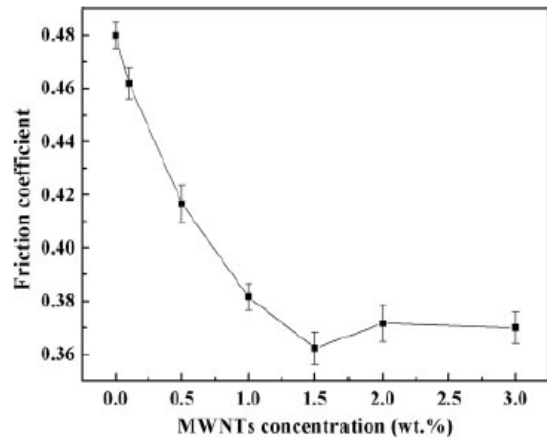
Polimetilmetakrilat (PMMA) matris malzemesine değişik oranlarda (% 0,05- 0,1- 0,25- 0,75- 1,0- 1,5- 2,5) karbon nanotüp (CNT) ilavesinin sürtünme katsayısına etkisi Şekil 6'da verilmiştir [37]. PMMA-CNT kompozitlerin sürtünme katsayısı % CNT'nin artması ile azalmıştır. Özellikle %1'in altında CNT ilavesinin sürtünme katsayısını hızlı bir şekilde düşürdüğü belirlenmiştir. Ayrıca % CNT'nin artması ile sürtünme katsayısı daha kararlı hale gelmiştir. Bu durumu, CNT'lerin mükemmel mekanik ve tribolojik özelliklerinin, polimer içerisine ilavesi ile de etkisini göstermesi olarak açıklamışlardır (37).



Şekil 6. Sürtünme katsayısı-% CNT grafiği (37).

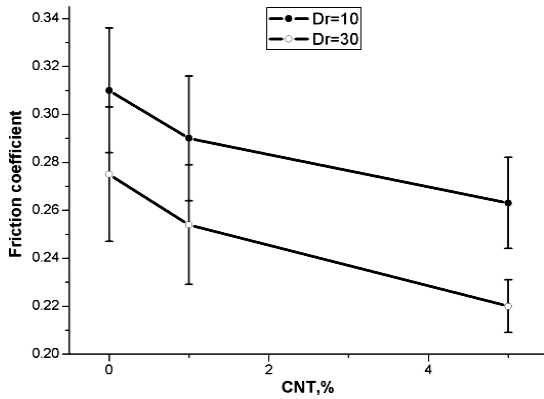
Çok benzer bir çalışmada çok benzer sonuçlar elde edilmiştir (38). Polyakrilonitril-metil metakrilat polimerine (AMMA) % 1,5'e kadar ilave edilen karbon nanotüp (CNT) miktarının sürtünme katsayısında hızlı bir düşüşe neden olduğu tespit edilmiştir. Ancak CNT'nin sürtünme katsayısına etkisi % 1,5'ten sonra azalmış ve sürtünme katsayısı kararlı hale gelmiştir. Bu verilerden hareketle sürtünme katsayısı açısından en ideal kompozitin %1,5 CNT katkılı polyakrilonitril-metil metakrilat kompoziti olduğunu söyleyebiliriz.

Matris malzemesindeki küçük bir değişikliğe rağmen benzer bir davranış, Dong ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada (39) da elde edilmiştir. Bu çalışmada, Polimetilmetakrilat/stiren/ matris malzemesine değişik oranlarda (% 0,1- 0,5- 1,0- 1,5- 2,0- 3,0) ortalama çapı 10-20 nm ve ortalama genişliği 1-2 µm olan çok duvarlı karbon nanotüp (PMMA / PS / MWCNT) ilave ederek hazırlanan kompozitlerin aşınma davranışları incelenmiştir. Şekil 7'de deneylerden elde edilen sürtünme katsayısı- % MWCNT grafiği görülmektedir. MWCNT oranının özellikle % 1,5'a kadar artması ile sürtünme katsayısı çok büyük oranda azalmıştır. Ancak MWCNT oranı % 1,5'i geçtikten sonra sürtünme katsayısındaki azalma durmuş ve daha kararlı hale gelmiştir. PMMA/PS/MWCNT kompozitler için sürtünme katsayısının en ideal oranın % 1,5 MWCNT kompozitinde elde edildiği belirlenmiştir.



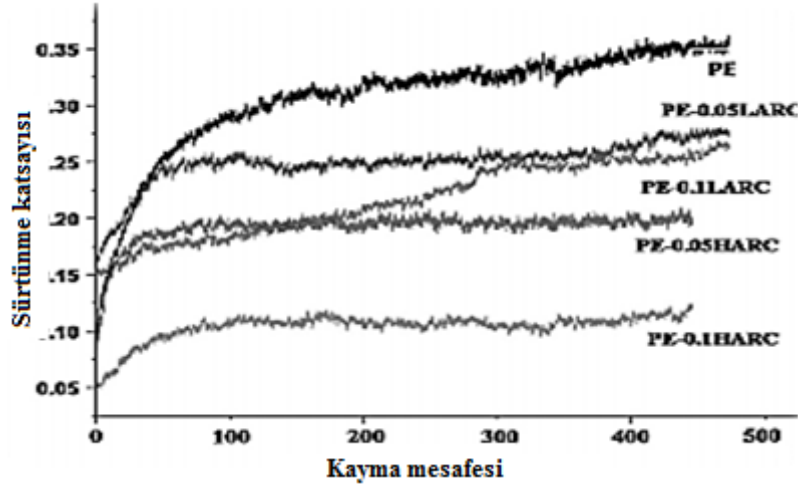
Şekil 7. Sürtünme katsayısı- % MWCNT grafiği (39).

Ultra yüksek yoğunluklu polietilen (UHMWPE) matris malzemesine uzunluk oranı (Dr: 5, 11, 15, 20, 25, 30) olan ve farklı oranlarda (%1, %2, %5) çok duvarlı karbon nanotüp (MWCNT) ekleyerek elde edilen kompozitlerle yapılan bir çalışmadan (40) elde edilen sürtünme katsayısı-%CNT grafiği Şekil 8'de görülmektedir. Yapılan deneyler sonucunda MWCNT/UHMWPE kompozitin sürtünme katsayısının katkısız UHMWPE'ye göre azaldığını tespit etmişlerdir. Şekilde görüldüğü gibi MWCNT uzunluk oranı arttıkça sürtünme katsayısı azalmaktadır. Ayrıca nanokatkinin miktarının artması ile de sürtünme katsayısının azaldığı görülmektedir. Sürtünme katsayısının azalmasını matris malzemeye ilave edilen MWCNT ile yeni bir mikroyapı oluşması, MWCNT/UHMWPE arasındaki arayüzeyde yeni ve güçlü bağların oluşması olarak açıklamışlardır.



Şekil 8. Sürtünme katsayısı % CNT grafiği (40).

Kumar vd. (41) çok yüksek yoğunluklu polietilen (UHMWPE) matris malzemesine en-boy oranı (çap: 10– 12 nm, boy: 8–12 µm) yüksek olan (HARC) ve en-boy oranı (çap: 40– 70 nm, boy: 1–3µm) düşük olan (LARC) karbon nanotüp (CNT_s) (%0,05-0,1) ilave ederek oluşturdukları kompozitin aşınma davranışlarını incelemişlerdir. Deneyleri Ball-on-disk cihazında 5N yük, 200 dev/dak. hız ve 2 saat süre ile yapmışlardır. Şekil 9'da üretilen kompozitlerin sürtünme katsayısı-yol grafiği görülmektedir. Sürtünme katsayısının en yüksek olduğu malzeme katkısız UHMWPE'dir. En düşük sürtünme katsayısı ise % 0,1HARC ilaveli kompozitte görülmüştür. Matris içerisine ilave edilen CNT oranının artması ile sürtünme katsayısı azalmıştır. LARC ilaveli kompozitlerin sürtünme katsayısı HARC ilavelilere göre daha yüksektir. Aynı zamanda LARC ilaveli kompozitlerin sürtünme katsayısı kayma mesafesi boyunca artış gösterirken, HARC ilaveli malzemeler ise kararlı bir durum sergilemişlerdir. Yapıya ilave edilen % 0,1HARC, LARC'a göre sürtünme katsayısını %120 azaltmıştır. Bu durumu, sürtünme sırasında daha büyük olan HARC'ların, LARC'lara göre matris içerisinde daha uzun süre kalarak sürtünmeyi azaltması olarak açıklamışlardır.



Şekil 9. Katkısız UHMWPE ve kompozitlerin sürtünme katsayısı-yol grafiği (41).

Sürtünme katsayısındaki azalmayı CNT'lerin sürtünme sırasında katı yağlayıcı etkisi göstermesi olarak açıklamışlardır. Çünkü nano boyuttaki CNT tabakaları birbirine güçlü Van Der waals bağları ile bağlıdırlar. Bu durum sürtünme sırasında karbon tabakaların parçalara ayrılmasını zorlaştırır. Sürtünme katsayısındaki azalmanın bir diğer sebebi yüzeydeki CNT'lerin, pürüzlerin arasına girip yuvarlanma etkisi göstererek sürtünmeyi azaltması olarak açıklamışlardır. Ayrıca CNT-polimer arasında bağ oluşumunda ve sürtünmede en-boy oranının önemli olduğunu belirtmişlerdir (41).

Poliamid 66 (PA 66) matris malzemesine üç farklı boyutta, %1 çok duvarlı karbon nanotüp (CNTs) ilave edilerek hazırlanan kompozitlerin aşınma davranışları incelenmiştir (42). Tablo 1'de karbon nanotüplerin boyutları görülmektedir. 0,05 m/s hızda en yüksek sürtünme katsayısı katkısız PA 66'da elde edilmiştir. Malzeme içerisine ilave edilen karbon nanotüplerin boyutları küçüldükçe sürtünme katsayısında azalma olduğunu tespit etmişlerdir. Kayma hızının 0,2 m/s hıza çıkarılması ile PA 66'da kararsız ve dalgalı bir sürtünme katsayısı gözlenmiştir. Yapıya ilave edilen karbon nanotüpler PA 66'nın sürtünme katsayısını azaltarak daha karalı hale getirmişlerdir. Sürtünme katsayısında meydana gelen azalmayı, karbon nanotüplerin yüksek ısı iletkenlikleri sayesinde

aşınma yüzeyindeki ısınmayı azaltması olarak açıklamışlardır.

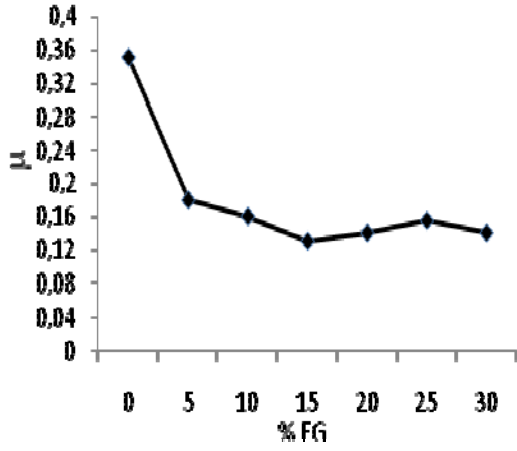
Tablo 1. Karbonnanotüplerin boyutları (42).

	S-CNT	M-CNT	L-CNT
Length (μm)	1-3	5-20	25-40
Diameter (nm)	15-25	15-25	15-25

3.3. Grafit ve grafen

Poliimid (PI) malzemeye nano boyutta (yapısı genişletilmiş) grafit (nano-EG) ilave ederek (% 5-30) oluşturulan kompozitin sürtünme ve aşınma davranışları incelenmiştir (43). Deneylelerden elde edilen sürtünme katsayısı- % nano-EG Şekil 10'da verilmiştir. Katkısız PI için 0,354 olarak ölçülen sürtünme katsayısı, PI içerisine % 5 nano-EG ilavesi ile bu değer 0,17, % 10 nano-EG'de ilavesi ile 0,155 değerine düşmüştür. Malzeme içerisine ilave edilen nano-EG oranının artması ile sürtünme katsayısındaki azalma devam etmiştir. En düşük sürtünme katsayısı değeri % 15 nano-EG ilave edilmiş numunede 0,135 olarak elde edilmiştir. Matris içerisindeki nano-EG oranının daha da artırılması sürtünme katsayısı üzerindeki etkisini azaltmıştır. Sürtünme katsayısındaki azalmanın nano-EG'nin yağlayıcı etkisi gösteren doğal

yapısından kaynaklandığını, bu etkinin sürtünme sırasında aşınma yüzeyinde koruyucu film tabakası oluşumunu arttırarak adesiv (yapışma) aşınmayı azaltması olarak açıklamışlardır.



Şekil 10. Sürtünme katsayısı- % nano-EG grafiği (43).

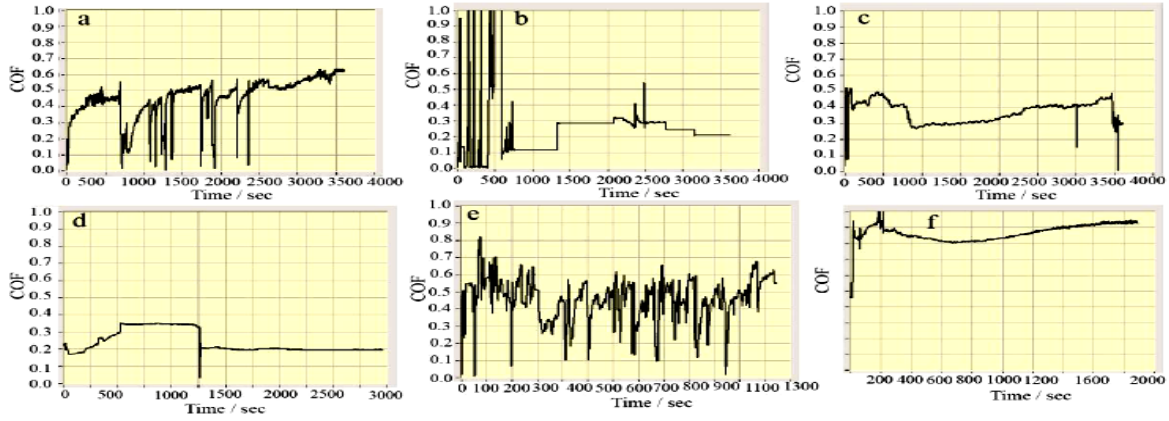
Bir başka çalışmada (44), Akrilo Nitril Butadiyen kauçuk (NBR) matris malzemesine mikron boyutunda %4 grafit (G) ve nano boyutta %4 grafen (nG) katkısının aşınma özelliklerine etkisi incelenmiştir. Tablo 2’de görüldüğü gibi yapılan deneyler sonucunda kompozite ilave edilen grafit ve grafenin sürtünme katsayısını düşürdüğü tespit edilmiştir. 10N aşındırma yükünde en düşük sürtünme katsayısı NBR-nG kompozitinde gözlenmiştir. Ancak yükün 20N’a artmasıyla NBR-nG’nin sürtünme katsayısı NBR’ninkinden düşüktür.

Tablo 2. NBR kompozitler ve sürtünme katsayıları (44).

S.No.	Sample and its code	Force (N)	COF (μ)
1	NBR	10	0,457
2	NBR-Graphite; NBR-G	10	0,422
3	NBR-Graphene; NBR-nG	10	0,373
4	NBR	20	0,868
5	NBR-Graphite; NBR-G	20	0,455
6	NBR-Graphene; NBR-nG	20	0,681

Fakat en iyi sonuç NBR-G de elde edilmiştir. Şekil 11'de deneylerde kullanılan malzemelerin sürtünme katsayısı-zaman grafikleri görülmektedir. NBR içerisine ilave edilen grafit ve grafen özellikle 10N yükte sürtünme katsayısını düşürerek daha kararlı hale getirmiştir. Yükün 20N'a çıkarılması ile NBR ve NBR-nG

malzemelerinde sürtünme katsayısı daha kararlı iken NBR-G'de ise değişkendir. Burada NBR-G malzemesinde mikro boyuttaki grafit tabakalarının sürtünme sırasında yüke bağlı olarak kırılarak matristen ayrılmasının dalgalanmalara sebep olduğu sanılmaktadır.

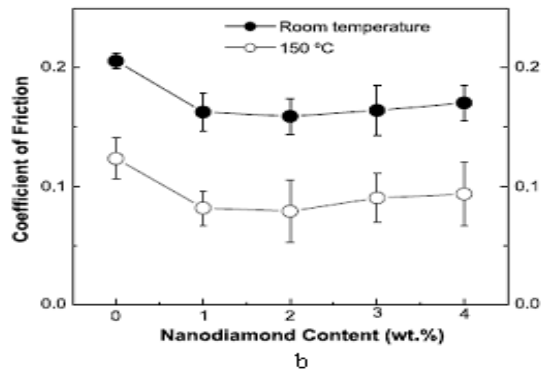
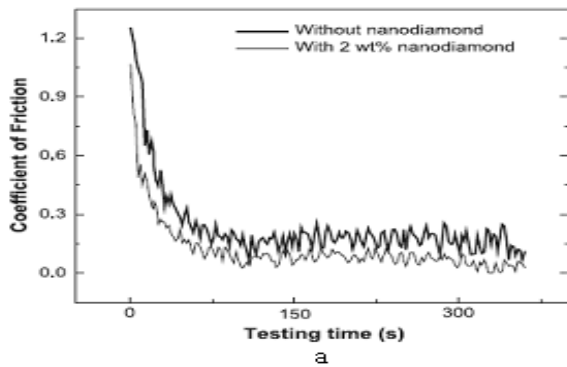


Şekil 11. Sürtünme katsayısı-zaman grafiği (a) NBR (b) NBR-Grafit ve (c) NBR-Grafen (yük 10N, 100 dev/dak.), (d) NBR (e) NBR-Grafit ve (f) NBR-Grafen (yük 20N, 100 dev/dak.) (44)

3.4. Elmas

Politetrafloroetilen (PTFE) filmin içerisine boyutları 5–10 nm aralığında %1-4 oranında olan nanoelmas parçacıkları ilave ederek üretilen kompozitlerin aşınma davranışları incelenmiştir (45). Şekil 12a'da görüldüğü gibi, %2 nanoelmas ilavesi ile katkısız PTFE'ye göre kompozitin hem sürtünme katsayısının azaldığı hem de daha kararlı hale geldiği vurgulanmıştır. Artan deney süresi ile sürtünme katsayısında artış tespit edilmiştir. En düşük sürtünme katsayısı %2 PTFE/PTFE nanoelmas katkılı kompozitte

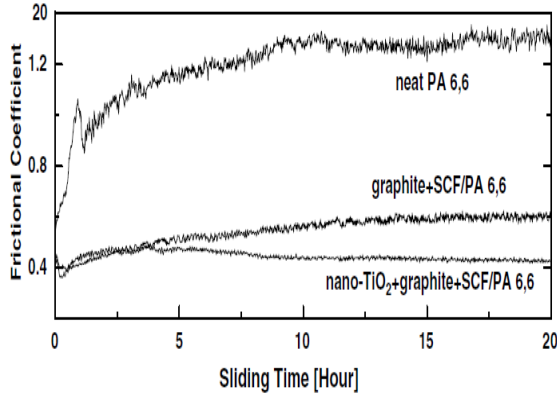
görülmüştür (Şekil 12b). Ancak malzeme içerisindeki nanoelmas oranının daha fazla artması ile sürtünme katsayısında artış kaydedilmiştir. Bu artışın, %2'den fazla nanoelmas ilavesinin aglomerasyona sebep olmasından kaynaklandığı sanılmaktadır. Deney sıcaklığının da etkili olduğu ve 150 °C'de tüm bileşimlerde oda sıcaklığına göre daha düşük sürtünme katsayıları elde edilmiştir. Sürtünme katsayısındaki değişimin, PTFE'ye ilave edilen nanoelmasın mikroyapıyı değiştirmesi ve ayrıca nanoelmasın aşınmaya karşı dirençli bir malzeme olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 12. Sürtünme katsayısı grafiği a) katkısız PTFE/ PTFE nano elmas katkı, b) % nano elmas oranına göre (45)

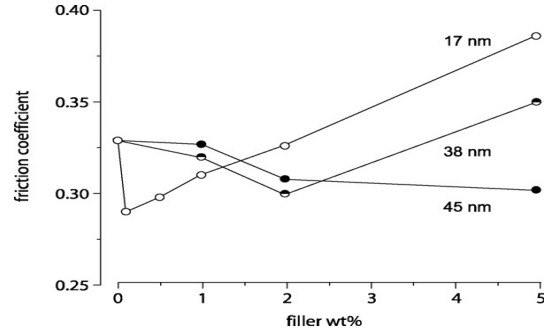
3.5. Metaloksitler

Bir çalışmada [46], PA66'ya nano-TiO₂, grafit ve kısa cam fiber eklenerek hazırlanan kompozitin aşınma davranışları incelenmiştir. Şekil 13'de görüldüğü gibi grafit ve kısa cam fiber ilavesi sürtünme katsayısını önemli derecede düşürmüştür. İlâveten nano-TiO₂ eklenmesi sürtünme katsayısını daha da düşürmekle kalmamış daha kararlı hale gelmesini sağlamıştır. Nano-TiO₂ katkısız malzemelerde zamana bağlı olarak sürtünme katsayısının artış eğiliminde olduğu saptanmıştır.



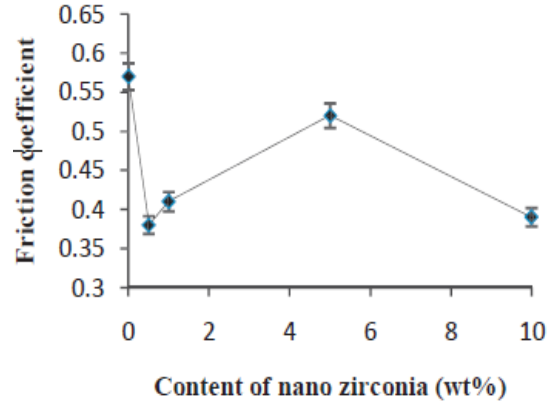
Şekil 13. Sürtünme katsayısı-zaman grafiği (hız: 1 m/s, yük: 1MPa),[46].

Polyethyleneterephthalate(PET) matris malzemesinin içerisine farklı boyutlarda (17, 38 ve 45 nm) ilave edilen alümina nanopartikülün kompozitin sürtünme katsayısına etkisi Şekil 14'te verilmiştir (47). Daha küçük boyutlu partikül ilavesinin sürtünme katsayısını azaltmada daha etkili olduğu belirlenmiştir. Ancak, sürtünme katsayısını düşürmek için optimum bileşim artan partikül boyutu ile artmaktadır.



Şekil 14. değişik boyutlardaki katkı malzemelerinin sürtünme katsayısına etkisi (47).

Kurahatti vd. (48) yapmış oldukları çalışmada epoksinin içerisine 60-100 nm boyutlarında, % 0,5–10 aralığında ZrO₂ ilave ederek kompozitin kuru ortamdaki aşınma davranışlarını incelemişlerdir. Şekil 15'te nano- ZrO₂ miktarına bağlı sürtünme katsayısının değişimi görülmektedir. Görüldüğü gibi en düşük sürtünme katsayısı % 0,5 nano-ZrO₂ içeren kompozitte elde edilmiştir. Katkısız epoksinin sürtünme katsayısı 0,57 iken, % 0,5 nano-ZrO₂ ilavesi ile sürtünme katsayısı 0,38'e düşmüştür.



Şekil 15. Sürtünme katsayısının nanoZrO₂ miktarına göre değişimi (48).

Bu düşüş azımsanamayacak kadar büyük ve önemlidir. Araştırmacılar, bu azalmayı, nanopartiküllerin katı yağlayıcı etkisi göstermesi, ZrO₂'in makaslanma (kırılma, kopma) etkisini azaltması ve sürtünme sırasında temas

bölgesindeki matris malzemenin sarılarak sürtünmesinin azaltılmasına bağlamışlardır.

4. GENEL SONUÇLAR

Yapılan incelemeler sonucunda nano katkıların polimerlerin sürtünme katsayısı üzerinde etkili olduğu görülmüştür. Bu etki polimer matrise ilave edilen nano katkının oranı ile ilgilidir. Sürtünme katsayısının en düşük olduğu oran genellikle %2-4 aralığıdır. Bu oranın değişmesi ile nano katkının etkinliği azalmaktadır. Nano katkıların boyutlarında aynı zamanda sürtünme katsayısını etkilemektedir. Burada nano katkının büyüklüğünün yanında en/boy oranı da önem teşkil etmektedir. Özellikle CNT'lerde en/boy oranının küçülmesi ile sürtünme katsayısının yükseldiği görülmüştür. Ancak genel olarak polimer matrise ilave edilen nano katkıların boyutlarının küçülmesi ile sürtünme katsayısının düştüğü söylenebilir. Nano katkıların sürtünme sırasında aşınma yüzeyindeki koruyucu film tabakası oluşumunda geleneksel katkılara göre daha etkili olması ve matris malzeme ile aralarında yeni bağlar oluşturması da sürtünme katsayısını etkileyen diğer önemli faktörlerdir.

KAYNAKLAR

- Sarıtaş, S.,1995. Engineering Metallurgy and Materials, p 5-30, Ankara, Türkiye.
- Agarwal,B,D., Broutman, L, J., 1980. Analysis and performance of fiber composites, John Wiley & Sons, New York, A.B.D.
- Koç, E., 2006. Makina Elemanları Cilt 2, Nobel Yayınevi, 2. Baskı, 6054649181,Adana.
- Bahadur, S., 2000. The development of transfer layers and their role in polymer tribology. *Wear*, 245 92-99.
- Kragelskii, I, V., 1982. Friction and Wear, Pergamon Press, Elmsford.

Pesetskii, S.,Bogdanovich, P., Myshkin, N, K., 2008.Tribological behavior of polymer nanocomposites produced by dispersion of nanofillers in molten thermoplastics. *Tribology and Interface Engineering Series*, 55 87-88.

Çıracı, S., Özbay, E., O, Gülseren, H., Demir, V., Bayındır, M., Oral, A., Senger, T., Aydınli, A., Dana, A.,2005. Türkiye'de Nanoteknoloji, *Bilim ve Teknik Dergisi*, Ağustos Sayısı, 4-23.

Kaya, M., 2003. Plastik Nanokompozitler, *Pagev Plastik Dergis*, Mart-Nisan Sayısı, 84.

Saçaklı, Y., 2011. Değişik Partikül Boyutlarındaki Mg(OH)₂ Katkılı Polipropilen (Pp) Nanokompozitinin Özelliklerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Marmara Üniversitesi, İstanbul.

Sheng, N., Boyce, M,C., Parks, D,M., Rutledge, G,C., Abes,J,I.,Cohen,,R,E.,2004.Multiscalemicrom.echanical modeling of polymer/clay nanocomposites and the effective clay particle. *Polymer*, Vol. 45, 487-506.

Olad, A., 2011. "Nanotechnology and Nanomaterials" Advances in Direrse industrial *Applications of Nanocomposites*, ISBN 976-953-307-202-9.

Sokolov, V, I., Stankevich, I, V., 1993. The fullerenes – New allotropic forms of carbon: Molecular and electronic structure, and chemical properties. *Russ. Chem. Rev.* 62 5 419-435.

Ni, B., Rotello, V., 1997. Attachment of fullerenes to materials: The importance of backbone-fullerene interactions. *J. Phys. Chem. Solids*, 58 11 1897-1899.

Ginzburg, B, M., Shibaev, L, A., Kireenko, O, F, Shepelevskii, A, A., Melenevskaya, E, Y., Ugolkov, V, L., 2005. Thermal degradation of fullerene-containing polymer systems and formation of tribopolymer films. *Polymer. Science*, A47 2 160-174.

Pesetskii, S, S., Zhdanok, S, A., Buyakov, I, F., Bogdanovich, S, P., Solntsev, A, P., Krauklis, A,V.,

2004. Structure and properties of polyamide 6 modified in melt with carbon nanomaterials. *Doklady Natsionalnoi Akademii Nauk Belarusi (Reports of National Academy of Science of Belarus)*, 48(6) 102–107.
- Ke, Y, C., Stroeve, P. 2005. Polymer-Layered Silicate and Silica Nanocomposites, *Elsevier*, Amsterdam, 398 9780080457581.
- Pomogailo, A, D., Rozenberg, A, S., Ufliand, I, E, 2000. Metal nanoparticles, in *Polymers*, Khimia, Moscow, (Russian translation).
- Rong, M, Z., Zhang, M, Q., Liu, H., Zeng, H, M., Wetzel, B., Friedrich, K., 2001. Microstructure and tribological behavior of polymeric nanocomposites, *industrial lubrication & Tribology.*, 53 72–77.
- Rong, M, Z., Zhang, M, Q., Zheng, Y, X., Zeng, H, M., Friedrich, K., 2001. Improvement of tensile properties of nano-SiO₂/PP composites in relation to percolation mechanism. *Polymer*, 42 3301–3304.
- Zhang, H., Zhang, Z., Friedrich, K., Eger, C., 2006. Property improvements of in situ epoxy nanocomposites with reduced interparticle distance at high nanosilica content. *Acta Materialia*, 54 1833–1842.
- Kuo, M, C., Tsai, C, M., Huang, J, C., Chen, M., 2005. PEEK composites reinforced by nano-sized SiO₂ and Al₂O₃ particulates. *Materials Chemistry and Physics*, 90 185–195.
- Chisholm, N., Mahfuz, H., Rangari, V, K., Ashfaq, A., Jeelani, S., 2005. Fabrication and mechanical characterization of carbon/SiC-epoxy nanocomposites. *Composite Structures*, 67 115–124.
- Evora, V, M, F., Shukla, A., 2003. Fabrication, characterization, and dynamic behavior of polyester/TiO₂ nanocomposites. *Material Science Engineering, A*, 361 358–366.
- Lam, C, K., Lau, K, T., 2006. Localized elastic modulus distribution of nanoclay/epoxy composites by using nano indentation. *Composite Structures*, 75 553–558.
- Lin, J, C., Chang, L, C., Nien, M, H., Ho, H, L., 2006. Mechanical behavior of various nanoparticle filled composites at low-velocity impact. *Composite Structures*, 74 30–36.
- Matejka, L., Dukh, O., Kolarik, J., 2000. Reinforcement of crosslinked rubbery epoxies by in situ formed silica. *Polymer*, 41 1449–1459.
- Wetzel, B., Hauptert, F., Zhang, M, Q., 2003. Epoxy nanocomposites with high mechanical and tribological performance. *Composite Science Technology*, 63 2055–2067.
- Wetzel, B., Rosso, P., Hauptert, F, Friedrich, K., 2006. Epoxy nanocomposites – fracture and toughening mechanisms. *Engineering Fracture Mechanics*, 73 2375–2398.
- Alexandre, M., Dubois, P., 2000. Polymer-layered silicate nanocomposites: preparation, properties and uses of a new class of materials. *Materials Science and Engineering*, 28 1–63.
- Srinath, G., Gnanmoorthy, R., 2005. Effect of nanoclay reinforcement on tensile and tribo behavior of Nylon6. *J Material Science*, 40 11 2897–901.
- Srinath, G., Gnanmoorthy, R., 2007. Sliding wear performance of polyamide 6–clay nanocomposites in water. *Composites Science and Technology*, 67 399–405.
- Carrión, F, J., Arribas, A., Bermúdez, M, D., Guillamon, A., 2008. Physical and tribological properties of a new polycarbonate-organoclay nanocomposite. *European Polymer Journal* 44 968–977.
- YiPeng, Q., Cong, P, H., JunLiu, X., XiLiu, T., Huang, S., ShengLi, T., 2009. The preparation of PVDF/clay nanocomposites and the investigation of their tribological properties. *Wear*, 266 713–720.

- Kaştan, A., 2015. PA 6/ PE / Nano-kil kompozitlerin özelliklerinin incelenmesi, Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyonkarahisar
- Konovalova, O., Suchaneka, J., Taticeka, F., Puchninb, M., 2014. Tribological analysis of the nano-modified industrial polymer. *Procedia Engineering*, 69 (1481 – 1489).
- Sirong, Y., Zhongzhen, Y., Wing, M, Y., 2007. Effects of SEBS-g-MA on tribological behaviour of nylon 66/organoclay nanocomposites. *Tribology International*, 40 855–862.
- Z, Yanga., B, Donga., Y, Huanga., L, Liub., F, Y, Yanb., H, L, Lia., (2005). A study on carbon nanotubes reinforced poly(methyl methacrylate) nanocomposites. *Materials Letters* 59 2128– 2132.
- Wang, C., Dong, B., Gao, G,Y., Xu, M, W., Li, H, L., 2008. A study on microhardness and tribological behavior of carbon nanotubes reinforced AMMA-CNTs copolymer nanocomposites. *Materials Science and Engineering*, A 478 314–318.
- Dong, B., Wang, C., He, B, L., Li, H, L., 2006. Preparation and Tribological Properties of Poly(methylmethacrylate)/Styrene/MWNTs Copolymer Nanocomposites. *Journal of Applied Polymer Science*, 108 1675-1679.
- Wei, Z., Zhao, Y, P., Ruan, S, L., Gao, P., Yu, T, X., 2006. A study of the tribological behavior of carbon-nanotube-reinforced ultra high molecular weight polyethylene composites. *Surface and Interface Analysis*, 38: 883–886.
- Kumar, R, M., Sharma, S, K., Kumar, B,V, M., Lahiri, D., 2015. Effects of carbon nanotube aspect ratio on strengthening and tribological behavior of ultra high molecular filler content and polymer matrix composition Polymer 51 3956_3965weight polyethylene composite. *Composites*, 76 62–72.
- Lee, S, M., Shin, M, W., Jang, H., 2014. Effect of carbon-nanotube length on friction and wear of polyamide 6,6 nano composites. *Wear*, 32 103–110.
- Zhining, J., Caizhe, H., Yanhong, Y., Yang, Y., 2015. Effects of nanoscale expanded graphite on the wear and frictional behaviors of polyimide-based composites. *Wear*, 338-339 282–287.
- Agrawal, N., Parihar, A, S., Singh, J, P., Goswami, T,H., Tripathi, D, N., 2015. Efficient Nanocomposite formation of Acrylo Nitrile Rubber by incorporation of Graphite and Graphene layers: Reduction in Friction and Wear Rate. 2nd International Conference on Nanomaterials and Technologies (CNT 2014) *Procedia, Materials Science*, 10 139 – 148.
- Lee, J, Y., Lim, D, S., 2004. Tribological behavior of PTFE film with nanodiamond. *Surface & Coatings Technology*, 188–189 534– 538.
- Chang, L., Zhanga, Z., Zhanga, H., Schlarba, A,K., 2006. On the sliding wear of nanoparticle filled polyamide 66 composites. *Composites Science and Technology*, 266, 3188- 98.
- Bhimaraj, P., Burris, D., Sawyer, W, G., Toney, C, G., Siegel, R, W., Schadler, L, S., 2008. Tribological investigation of the effects of particle size, loading and crystallinity on poly(ethylene) terephthalate nanocomposites. *Wear*, 264 7–8 632–637.
- Kurahattia, R,V., Surendranathanb, A, O., Kumarc, A,V, R., Wadagerid, C, S., Auradie, V., Korif, S, A., 2014. Dry Sliding Wear behaviour of Epoxyreinforced with nanoZrO2 Particles, International Conference on Advances in Manufacturing and Materials Engineering, AMME 2014. *Materials Science*, 5 274 – 280.