

ÇOK DUVARLI KARBON NANOTÜP KATKILI POLİPROPİLEN NANOKOMPOZİTLERİN KURU SÜRTÜNME VE AŞINMA ÖZELLİKLERİ ÜZERİNE YÜK VE KAYMA HIZININ ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

Salih Hakan YETGİN^{1*}

¹ Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Simav Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Simav-Kütahya, ORCID No : <http://orcid.org/0000-0002-6068-9204>

Anahtar Kelimeler	Öz
Polipropilen Karbon nanotüp Aşınma Sürtünme	<i>Bu çalışmada, uyumlaştırıcı kullanılmadan ağırlıkça %0.1, %0.2, %0.3, %1 ve %2 oranlarında çok duvarlı karbon nanotüp (ÇDKNT) katkılı Polipropilen (PP) nanokompozitlerinin tribolojik özellikleri incelenmiştir. PP nanokompozitler iki aşamalı ergiyik kalıplama prosesi ile üretilmiştir. İlk aşamada, çift vidalı ekstruderde PP nanokompozit granüller hazırlanmıştır. Granüller hızlı bir şekilde soğutulmuştur. İkinci aşamada, nanokompozit granüller triboloji test numunelerini üretmek için enjeksiyon kalıplama tekniği ile kalıplanmıştır. ÇDKNT katkılı PP nanokompozitlerin aşınma ve sürtünme davranışları 0.8, 1.2m/s, ve 1.6m/s kayma hızı ve 10, 20, 30 ve 40N yük altında kuru ortam şartlarında pim-disk sistemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. En düşük sürtünme katsayısı 0.8m/s kayma hızında ve 10N yük altında 2ÇDKNT polimerinde 0.393 değeri ile elde edilmiştir. PP polimerine ilave edilen ÇDKNT ve artan ÇDKNT miktarına bağlı olarak aşınma oranının azaldığı belirlenmiştir. 0.1ÇDKNT, 0.2ÇDKNT, 0.3ÇDKNT, 1ÇDKNT ve 2ÇDKNT nanokompozitlerin aşınma direnci katkısız PP polimerine göre sırasıyla %18, %31, %50, %94 ve %233 oranlarında daha yüksek elde edilmiştir.</i>

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF SLIDING SPEED AND LOAD ON DRY SLIDING FRICTION AND WEAR PROPERTIES OF MULTI WALLED CARBON NANOTUBE FILLED PP NANOCOMPOSITES

Keywords	Abstract
Polypropylene Carbon nanotube Wear Friction	<i>In this study, tribological properties of 0.1%, 0.2%, 0.3%, 1% and 2% by weight multi walled carbon nanotube (MWCNT) filled polypropylene (PP) nanocomposites without using a compatibilizer were investigated. PP nanocomposites were produced with two-step melting process. In the first step, PP nanocomposite pellets were prepared by using a co-rotating twin-screw extruder. The extrudates were cooled down quickly and pelletized. In the second step, nanocomposite pellets were molded to produce tribological test samples by using an injection molding machine. The wear and friction behaviour of MWCNT filled PP nanocomposites were performed at 0.8, 1.2 and 1.6 m/s sliding speed and 10, 20, 30 and 40N load under dry environment conditions by using pin-on-disc system. The lowest coefficient of friction was obtained for 2MWCNT composite with a value of 0.393 at 0.80 m/s sliding speed and 10N load. The wear rate of PP polymer decreased with increasing MWCNT amount. The wear strength of 0.1MWCNT, 0.2MWCNT, 0.3MWCNT, 1MWCNT and 2MWCNT nanocomposites are, respectively, 18%, 31%, 50%, 94% and 233% higher than those of pure PP composites.</i>
Araştırma Makalesi	Research Article
Başvuru Tarihi : 09.04.2020	Submission Date : 09.04.2020
Kabul Tarihi : 01.06.2020	Accepted Date : 01.06.2020

1. Giriş

Lijima'nın 1991'deki karbon nanotüpler (KNT) hakkındaki raporundan bu yana (Lijima, 1991), KNT'ler benzersiz atomik yapısı, yüksek en boy oranı, yüksek mukavemet/ağırlık oranı, olağanüstü mekanik

özellikleri (1-2TPa arası elastik modülü ve 200 GPa gerilme mukavemeti) (Yakobson, Brabec ve Bernholc 1996; Cornwell ve Wille, 1997), üstün termal ve elektriksel özellikleri (vakumda veya inert atmosfer ortamında 2800°C'ye kadar termal kararlılık, elmadan iki kat termal iletkenlik (Kim, Shi, Majumdar ve McEuen

* Sorumlu yazar; e-posta : shyetgin@gmail.com

2001) ve bakır tellerden 1000kat daha yüksek elektrik-akım-taşıma kapasitesi) ile ilgi çekmektedir. KNT'lerin bu özellikleri, kompozit malzemeler için ideal bir dolgu malzemesi olarak yeni bilimsel ve teknolojik fırsatlar sunmaktadır. Geçmişten günümüze kadar tek duvarlı karbon nanotüp (TDKNT) ve çok duvarlı karbon nanotüp (ÇDKNT) katkılı metal matrisli, seramik matrisli veya polimer matrisli kompozitler hazırlanmıştır. Polimer malzemeler, geleneksel yöntemler kullanılarak üretimleri esnasında KNT'lere zarar vermeden kolayca şekillendirilebilmekte ve karmaşık şekilli bileşenler imal edilebilmektedir. Dolayısıyla üretim maliyeti azaltılabilmektedir. Farklı uygulama amaçlarına göre, KNT/polimer kompozitleri yapısal kompozitler ve fonksiyonel kompozitler olarak sınıflandırılabilir. KNT'ler bu kompozitlerde farklı rol oynamaktadır. Yapısal KNT/polimer kompozitler için, yüksek elastiklik, yüksek çekme dayanımı, yüksek kopma uzaması gibi KNT'lerin benzersiz mekanik özellikleri genellikle hafif, yüksek elastiklik modülü, yüksek gerilme ve basınç mukavemeti ve sertliğe sahip yapısal malzemeler elde etmek için kullanılmaktadır. Bununla birlikte, fonksiyonel KNT/polimer kompozitler için, yüksek elektrik ve termal iletkenlik gibi KNT'lerin diğer üstün özellikleri genellikle ısı direnci, kimyasal hassasiyet, elektriksel iletkenlik, termal iletkenlik, elektromanyetik soğurma veya enerji depolama performansı istenilen durumlarda fonksiyonel malzemeleri geliştirmek için kullanılmaktadır (Du, Bai ve Cheng, 2007).

Son yıllarda, Polimetil-metakrilat (PMMA), polietere-eter-keton (PEEK), polivinil alkol (PVA), Polivinilklorür (PVC), polipropilen (PP), poliamit (PA), polietilen (PE) ve polistren (PS) gibi birçok polimer türü KNT katkılı polimer nanokompozitleri oluşturmak için matris malzemesi olarak kullanılmıştır. Mekanik, elektrik, termal, optik ve birçok diğer özellikler farklı uygulamalar için araştırmacılar tarafından çalışılmıştır. Bu araştırmaların sonuçları, KNT katkılı polimerlerin performanslarının, KNT türü (TDKNT veya ÇDKNT) ve morfolojisi, yapısı (çapı, uzunluğu ve saflığı), üretim yöntemi, matris seçimi, matris içerisinde KNT dağılımı ve matris ile KNT arasındaki arayüzey etkileşimi gibi birçok faktöre bağlı olduğunu göstermiştir. En yaygın KNT/polimer kompozit üretimleri, solüsyon karıştırma, ergiyik harmanlama ve yerinde (in-situ) polimerizasyon teknikleridir. Xu, Thwe, Shearwood ve Liao (2002) KNT/epoksi kompozitlerini solüsyon karıştırma yöntemi ile üretmişler ve özelliklerini incelemişlerdir. KNT katkılı termoplastik esaslı kompozitlerin üretiminde en çok tercih edilen ergiyik harmanlama yöntemini kullanılarak, ÇDKNT katkılı PMMA kompozitleri Jin, Pramoda, Xu ve Goh (2001) tarafından üretilmiştir. Çalışma sonucunda, polimer içerisinde homojen olarak dağılmış KNT katkının dinamik mekanik özellikleri geliştirdiği belirtilmiştir. Hangi üretim yöntemi kullanılırsa kullanılsın, en önemli amaç

polimer matris içerisinde uniform dağılmış KNT'lerin elde edilmesidir (Du ve diğ., 2007).

Polipropilen (PP) polimeri, poliolefin ailesinin bir üyesi olup α -formu ve β -formu gibi kristalin formlarda bulunabilen yarı-kristal bir termoplastiktir. PP polimeri, fiziksel ve kimyasal özelliklerinin yanında diğer termoplastik malzemelere göre ucuz olması sebebiyle askeri, paketleme, otomotiv ve inşaat sektörü gibi alanlarda kullanılmaktadır. Ancak, PP polimerinin düşük termal, elektrik ve mekanik özelliklere aynı zamanda diğer polimer türleri ile karşılaştırıldığında kuru kayma şartları altında yüksek sürtünme katsayısına sahip olması kullanım alanını sınırlamaktadır. Kang, Yoon, Park, Lee ve Jeong (2010) ergiyik harmanlama yöntemi ile ürettikleri %0.5-5 oranlarında karbon nanotüp katkılı PP kompozitlerin elektrik, reolojik ve mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Artan KNT miktarı ile termal iletkenlik ve çekme dayanımının arttığını belirtmişlerdir. Yang, Shi, Pramoda ve Goh (2008), %0.5-2 oranlarında KNT ve %0.6 oranında maleik anhidrit aşılı PP uyumlaştırıcı katkılı PP kompozitleri ergiyik karıştırma yöntemi ile üretmişlerdir. KNT ilavesi ile PP polimerinin elastiklik modülünün, çekme dayanımının ve tokluğunun sırasıyla %118, %117 ve %141 oranlarında arttığı belirtilmiştir. Sandler ve diğ. (2007) ergiyik harmanlama ve solüsyon teknikleri ile ürettikleri KNT/PP kompozitlerin kristallenme özelliklerini incelemişlerdir. Prashanth ve diğ. (2008) ekstrüzyon prosesi sonrası ergiyik harmanlama yöntemi ile ürettikleri maleik anhidrit aşılı PP (PP-g-MA) ilaveli ÇDKNT/PP kompozitlerin mekanik özelliklerini incelemişlerdir. %2 PP-g-MA ilavesinde mekanik özelliklerin geliştiği belirtilmiştir. Zaikov ve diğ. (2010) ÇDKNT/PP kompozitlerin termal bozunma davranışlarını incelerken Pan, Li, Chan ve Zhao (2010) ise ÇDKNT/PP kompozitinde, KNT dağılımının elektriksel özellikler üzerine etkilerini incelemişlerdir. PP polimeri ile KNT arasındaki etkileşimi geliştirmek için maleik anhidrit aşılı polipropilen (PP-g-MA) katkılı PP/KNT kompozitlerin özelliklerinin incelendiği çalışmalarda reolojik ve mekanik özelliklerin geliştiği belirtilmiştir (Po-Hsiang, Sushanta, Prabhakar, Nikhil ve Satish, 2016; Irena, Rumiana, Manuel, Ana ve Strashimir, 2016). Po-Hsiang ve diğ. (2016) fonksiyonelleştirilmiş ÇDKNT (f-ÇDKNT)/PP, saf ÇDKNT/PP ve MA-g-PP/f-ÇDKNT/PP nanokompozitleri üretmişler ve ÇDKNT ve PP-g-MA'nın kristallenme, reolojik ve mekanik özellikleri üzerine etkisini incelemişlerdir. Irena ve diğ. (2016) ise %0.05-1 arasında değişen ÇDKNT ve %0-7.5 arasında değişen PP-g-MA katkılı PP/ÇDKNT kompozitlerin termal, mekanik ve viskoelastik özelliklerini incelemişlerdir.

2. Bilimsel Yazın Taraması

Karbon nanotüpler, kendinden yağlamalı özellikleri ile tribolojik uygulamalarda da geniş bir şekilde kullanılmaktadır. Mertens ve Senthilvelan (2016)

ağırlıkça %0.5, 1.0, 3.0, ve 5.0 oranlarında ÇDKNT katkılı PP polimerinin tribolojik özelliklerini inceledikleri çalışma sonucunda PP polimerine ilave edilen ÇDKNT miktarı ile sürtünme katsayısının ve aşınma miktarının azaldığını belirtmişlerdir. En düşük sürtünme katsayısının %1 KNT katkılı PP kompozit numunesinde, en yüksek sürtünme katsayısının ise katkısız PP polimerinde elde edildiğini belirtmişlerdir. Chen ve diğ. (2003) farklı oranlarda KNT katkılı politetrafloretlen (PTFE) kompozitlerin kuru ortamda tribolojik özelliklerini incelemişlerdir. PTFE polimerine ilave edilen KNT ile aşınma direncinin arttığı sürtünme katsayısının ise azaldığı belirtilmiştir. Yang ve diğ. (2005a) KNT-PMMA kompozitlerin tribolojik performanslarını incelemişlerdir. KNT miktarının artması ile aşınma oranı ve sürtünme katsayısı azalmıştır. Yang ve diğ. (2005b) yaptıkları bir başka çalışmada ise KNT/PS kompozitlerinin mikro sertlik ve aşınma özelliklerini incelemişlerdir. KNT katkının kendinden yağlamalı özelliği PS kompozitin aşınma direncini ve sertliğini geliştirdiği belirtilmiştir. Jian ve Liqiang (2010) %20 karbon fiber (CF) katkılı polieter-eter-keton (PEEK) ile %20 karbon fiber+%5 karbon nanotüp (KNT) katkılı PEEK kompozitlerinin mekanik ve tribolojik özelliklerini incelemişlerdir. PEEK polimerine ilave edilen CF ve KNT katkıları ile çekme dayanımı ve elastiklik modülünün arttığı belirtilmiştir. 20CF/PEEK polimerine ilave edilen KNT katkının hem aşınma oranını hem de sürtünme katsayısını azalttığı belirtilmiştir. Chawla (2018), KNT katkılı doğal kauçuk kompozitlerin farklı kayma hızlarındaki tribolojik özelliklerini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda, doğal kauçuğa ilave edilen KNT katkının sürtünme katsayısını ve aşınma oranını sırasıyla %24 ve %17 oranlarında azalttığını belirtmiştir. Ayrıca, kayma hızının 1m/s'den 11m/s'ye artırılması ile katkısız doğal kauçuğun ve KNT katkılı doğal kauçuğun sürtünme katsayılarının sırasıyla %13.2 ve %17.9 oranlarında azaldığını belirtmiştir. Yuanhao, Jingfu, Gai ve Qingjun (2020) KNT ve grafen oksit (GO) katkılı polimid (PI) polimerinin mekanik ve tribolojik özelliklerini çalışmışlardır. PI polimerine ilave edilen KNT ve GO katkılarının hem setlik hem de darbe dayanımını artırdığını belirtmişlerdir. Ayrıca, KNT ve GO katkıları PI kompozitin sürtünme katsayısı ve aşınma oranını azaltmıştır. Minhaeng (2008), farklı oranlarda (%0.2, 1, 2, 5, 10) ÇDKNT katkılı Poli-fenilen-sülfid (PPS) polimerinin tribolojik özelliklerini incelediği çalışmada, en düşük aşınma oranının %0.2 oranında ÇDKNT katkılı PPS polimerinde elde edildiğini belirtmiştir. En yüksek sürtünme katsayısı ise %10 oranında ÇDKNT katkılı PPS polimerinde elde edilmiştir.

KNT katkılı polimer kompozitlerin, sadece mükemmel termal ve mekanik özellikleri için değil, aynı zamanda üstün sürtünme ve aşınma özellikleri için de farklı endüstrilerde kullanılabileceği öngörülmektedir. Literatürden de anlaşılacağı üzere gerek uyumlaştırıcı ilave edilerek gerekse uyumlaştırıcı ilave edilmeden KNT katkılı polimerlerin mekanik, termal, elektriksel ve

reolojik özelliklerinin incelendiği çalışmalar mevcuttur. Bu çalışmada ise uyumlaştırıcı kullanılmadan, farklı oranlarda ÇDKNT katkılı PP kompozitlerinin aşınma ve sürtünme özellikleri incelenmiştir. PP/ÇDKNT katkılı numuneler ekstrüzyon prosesini takiben enjeksiyon kalıplama yöntemi ile üretilmiştir. ÇDKNT katkının, aşınma ve sürtünme özellikleri üzerine etkisinin yanında literatürden farklı olarak, uygulanan kayma hızı ve yükün etkileri de incelenmiştir. Deneysel çalışmalar kuru ortam şartları altında pim-disk sistemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deneylerde üç farklı kayma hızı (0.8, 1.2 ve 1.6 m/s) ve dört farklı yük (10, 20, 30 ve 40 N) kullanılmıştır. Aşınan pim ve disk yüzeyleri için optik mikroskop çalışmaları yapılmıştır.

3. Yöntem

Çalışmada, matris malzemesi olarak yoğunluğu 0.9g/cm³ ve ergiyik akış indeksi 1.3g/10dak. (230°C-2.16kg) olan PP3374E3 ticari kodlu Exxonmobil Chemical Company firmasından temin edilen polipropilen polimeri kullanılmıştır. Takviye elemanı olarak kullanılan çok duvarlı karbon nanotüp ise Detsan A.Ş. (Türkiye) firmasından temin edilmiştir. Firma verilerine göre ÇDKNT, >%97'den yüksek saflığa, >200m²/g büyük yüzey alanına sahiptir. Dış çapı 10-20nm ve uzunluğu ise 10-30µm'dir. Ergiyik karıştırma prosesinden önce PP polimeri, 80°C'de 24 saat boyunca kurutulmuştur. PP/ÇDKNT nanokompozitleri iki aşamalı karıştırma prosesi ile üretilmiştir. İlk aşamada, PP/ÇDKNT granülleri, çift vidalı ekstrüzyon prosesi ile hazırlanmıştır. Üretimlerde 350dev/dak vida hızı ve besleme hunisinden kalıba doğru 160-200°C sıcaklık dağılımı kullanılmıştır. İkinci aşamada ise nanokompozit granüller tribolojik test numuneleri için enjeksiyon kalıplama yöntemi ile 5mm çapında ve 50mm uzunluğunda kalıplanmıştır. Kovan sıcaklığı 215-230°C arasında ayarlanmış ve kalıp sıcaklığı 30°C'de sabitlenmiştir. Enjeksiyon basıncı 88bar ve enjeksiyon hızı 44dev/dak. olarak belirlenmiştir. PP nanokompozitlerin üretiminde ağırlıkça %0.1, %0.2, %0.3, %1 ve %2 oranlarında ÇDKNT kullanılmış ve üretilen numuneler sırasıyla 0.1ÇDKNT, 0.2ÇDKNT, 0.3ÇDKNT, 1ÇDKNT ve 2ÇDKNT olarak kodlanmıştır. Sürtünme katsayısı ve aşınma oranlarının belirlenmesi için tribolojik testler ASTM G99 standardına uygun olarak, oda sıcaklığında, kuru ortam şartları altında, 0.8, 1.2 ve 1.6m/s kayma hızı ile 10, 20, 30 ve 40N yük altında pim-disk sistemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. 5mm çapa ve 50mm uzunluğa sahip silindirik pim numuneleri 1040 çeliğine (Ra=0.45-0.55µm) karşı test edilmiştir. Şekil 1'de pim-disk aşınma cihazı resmi verilmiştir.



Şekil 1. Pim-disk Aşınma Cihazı

Tablo 1'de çalışmada kullanılan malzemeler, yoğunluk değerleri ve deney şartları verilmiştir. Her bir test öncesi, pim ve disk yüzeyleri alkol ile temizlenmiş ve kurutulmuştur. Pim numunelerin ağırlıkları deney öncesi ve sonrası ölçülerek ağırlık kaybı (Δm) belirlenmiştir. Aşınma oranı (K_0) ise Denklem 1'de verilen formül ile hesaplanmıştır. Burada, Δm : ağırlık kaybı (g), L: kayma mesafesi (m), ρ : malzeme yoğunluğu (g/cm^3), F: uygulanan yük (N).

$$K_0 = \frac{\Delta m}{L \times \rho \times F} \quad (1)$$

Tablo 1

Çalışmada Kullanılan Malzemeler ve Deney Şartları

Malzeme	Yoğunluk (g/cm^3)	Shore D	Yük (N)	Kayma hızı (m/s)	Sıcaklık (°C)	Nem (%)
PP	0.877	68				
0.1ÇDKNT	0.880	69	10	0.8		
0.2ÇDKNT	0.880	69.5	20	1.2	23±2	50±3
0.3ÇDKNT	0.890	70	30	1.6		
1ÇDKNT	0.890	71	40			
2ÇDKNT	0.895	72				

Bu çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

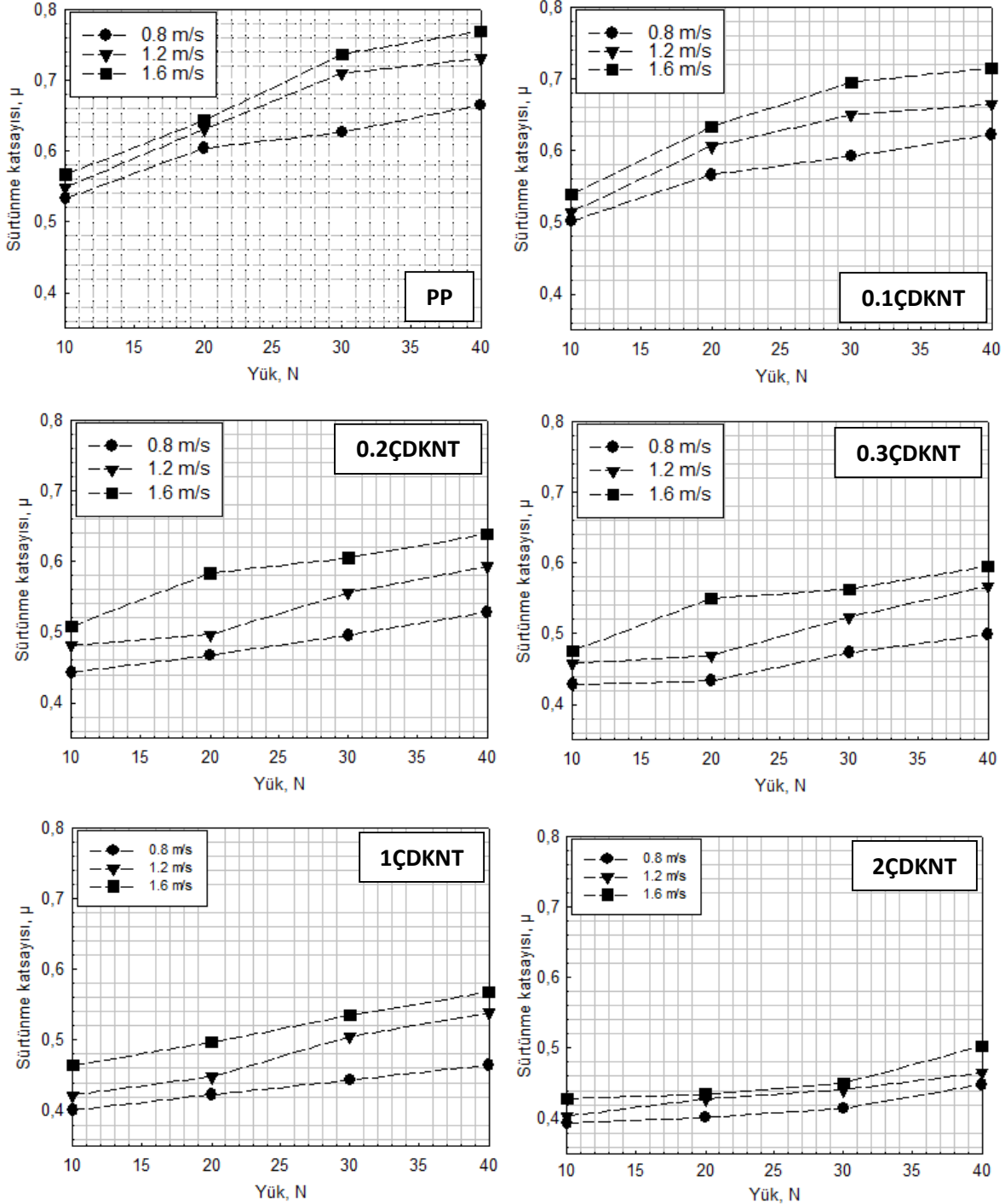
4. Bulgular

Şekil 2'de katkısız PP polimeri ile farklı oranlarda ÇDKNT katkılı PP nanokompozitlerin kayma hızı ve yük altındaki sürtünme katsayısı grafikleri verilmiştir. Grafikler incelendiğinde, katkısız PP polimeri ve ÇDKNT katkılı PP nanokompozitlerin artan yük değerleri ile sürtünme katsayılarının arttığı belirlenmiştir. Uygulanan yükün %300 oranında artırılması ile katkısız PP polimerinin sürtünme katsayısı ortalama %31 oranında artarken 0.1ÇDKNT polimerinde %28.6, 0.2ÇDKNT polimerinde %22.7, 0.3ÇDKNT polimerinde %21.8, 1ÇDKNT polimerinde %21.9 ve 2ÇDKNT polimerinde %15.4 oranında artmıştır. Bilindiği gibi polimerler uygulanan yük altında deformasyon süresince viskoelastik davranış gösterirler. Bu yüzden, sürtünme katsayısı ile uygulanan yük arasındaki ilişki

$\mu = KN^{(n-1)}$ ile açıklanmıştır. Burada, μ : sürtünme katsayısı, N: uygulanan yük, K ve n ise malzeme ile ilgili sabitlerdir ve "n" değeri $2/3 < n < 1$ arasındadır (Guofang, Yang ve Fu, 2004). Bu denkleme göre artan yük ile birlikte sürtünme katsayısı azalmaktadır ancak uygulanan yük polimerin limit değerlerine ulaştığında, polimer malzemenin kritik yüzey enerjisi nedeniyle hem sürtünme katsayısı hem de aşınma oranı artmaktadır. Ancak, Sudheera, Hemantha, Rajua ve Thirumaleshwara (2014) tarafından yapılan çalışmada, yükün artması ile sürtünme ısısı nedeniyle temas sıcaklığının arttığı ve artan bu arayüzey sıcaklığının polimer matrisi yumuşatarak kayma gerilimini azalttığı ve böylelikle sürtünme katsayısının azaldığını belirtmişlerdir. Kayma hızının 0.8m/s'den 1.6m/s'ye artırılması ile uygulanan yüke bağlı olarak, katkısız PP polimerinin sürtünme katsayısı ortalama %11.5, 0.1ÇDKNT polimerinin %12.9, 0.2ÇDKNT polimerinin %20.6, 0.3ÇDKNT polimerinin %19.1, 1ÇDKNT polimerinin %19.0 ve 2ÇDKNT polimerinin ise %9.4 oranlarında artmıştır. Katkısız PP polimerine ilave edilen farklı oranlardaki ÇDKNT katkının sürtünme katsayısı üzerine etkisi incelendiğinde ise artan ÇDKNT miktarına bağlı olarak sürtünme katsayısının önemli oranda azaldığı belirlenmiştir. 1.2m/s kayma hızı ve 30N yük ele alındığında, katkısız PP polimerinin 0.71 olan sürtünme katsayısı, %0.1 oranında ÇDKNT ilave edildiğinde %9.2 azalarak 0.65 değerine, %0.2 oranında ÇDKNT ilave edildiğinde %27.6 azalarak 0.55 değerine, %0.3 oranında ÇDKNT ilave edildiğinde %35.6 azalarak 0.52 değerine, %1 oranında ÇDKNT ilave edildiğinde %40.6 azalarak 0.50 değerine ve %2 oranında ÇDKNT ilave edildiğinde %60.9 azalarak 0.46 değerine ulaşmıştır. Chen ve diğ. (2003) yaptıkları çalışmada, artan KNT miktarına bağlı olarak KNT katkının kendinden yağlamalı özelliği nedeniyle sürtünme katsayısının azaldığını belirtmişlerdir. Bilindiği gibi polimer kompozitlerde takviye fazının esas görevi, yükü taşıyarak polimer matrisin rijitliğini ve dayanımını artırmaktır. Dolayısıyla uygulanan yükün takviye elemanı tarafından karşılanabilmesi için katkı elemanı ile polimer arasındaki ara yüzey bağının güçlü olması gerekmektedir. Kanagaraj, Varanda, Zhil'tsova, Oliveira ve Simoes (2007) yüksek yoğunluklu polietilen (YYPE) polimerine ilave ettikleri KNT katkının verimli yük transferi ve KNT ile YYPE arasındaki arayüzey bağının iyi olması sonucu mekanik özellikleri geliştirdiğini belirtmiştir. Mertens ve Senthilvelan (2016) ise KNT ilavesi ile artan mekanik dayanımın aşınma direncini artırdığını belirtmiştir. Benzer bir açıklama Jian ve Liqiang (2010) tarafından CF/PEEK ve CF/ÇDKNT/PEEK kompozitleri için yapılmıştır. CF/ÇDKNT'ün yüksek-spesifik-dayanıma ve kendinden yağlamalı özelliklere sahip olması gerek sürtünme katsayısının gerekse aşınma oranının azalmasında etkili olduğu belirtilmiştir. Ayrıca, KNT ilave edilmesi ile polimerin sünekliliğinin azaldığı ve verimli fiber-polimer adhezyonunun tribolojik özelliklerin

gelişmesinde etkili olduğu belirtilmiştir. Uygulanan yük ve kayma hızı aralığında en yüksek sürtünme katsayısı 1.6m/s kayma hızı ve 40N yük altında 0.769 değeri ile katkısız PP polimerinde elde edilirken en düşük sürtünme katsayısı 0.8m/s kayma hızında ve 10N yük

altında 2ÇDKNT polimerinde 0.393 değeri ile elde edilmiştir. Çalışma sonucunda, katkısız PP polimeri ve PP nanokompozitlerin sürtünme katsayısı üzerine uygulanan yükün kayma hızına göre daha etkili olduğu belirlenmiştir.



Şekil 2. Katkısız PP ve PP Nanokompozitlerin Yük ve Kayma Hızına Bağlı Olarak Sürtünme Katsayısı Değişimi

Tablo 2'de katkısız PP ve ÇDKNT katkılı PP nanokompozitlerin kayma hızı ve yüke bağlı olarak aşınma oranlarındaki değişim verilmiştir. Şekil 3 (a-

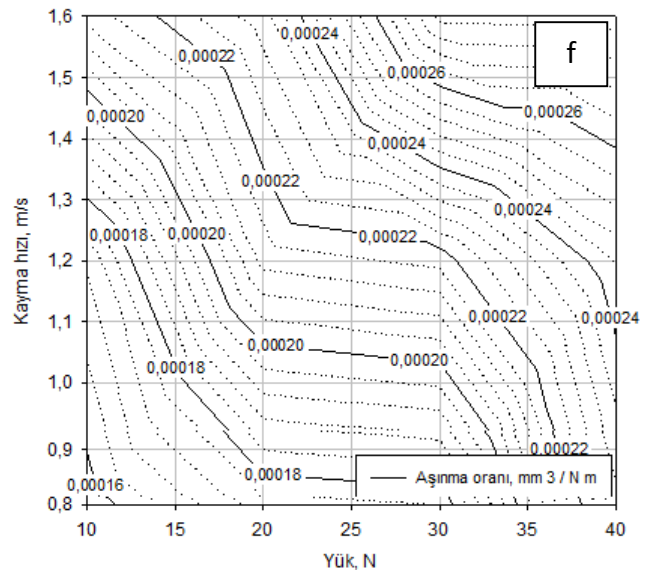
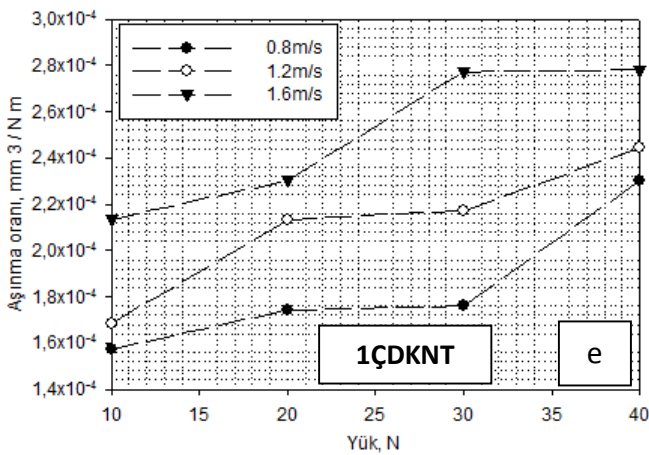
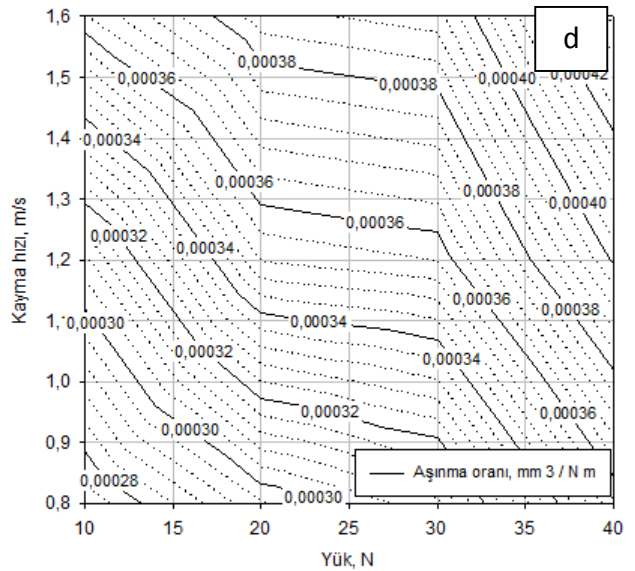
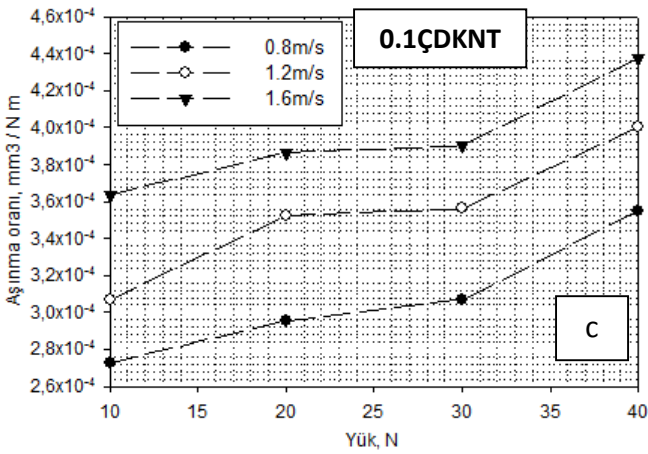
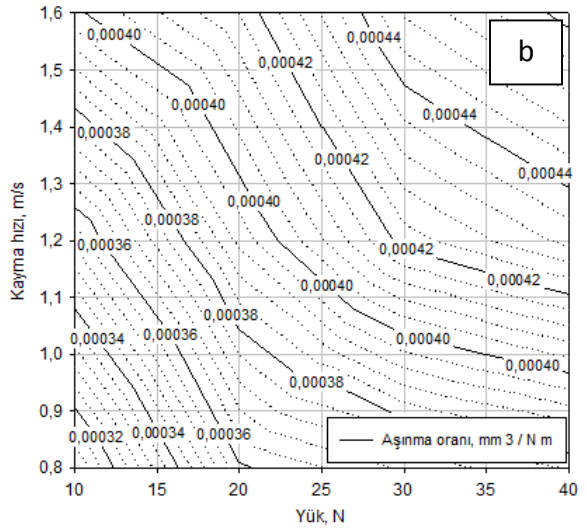
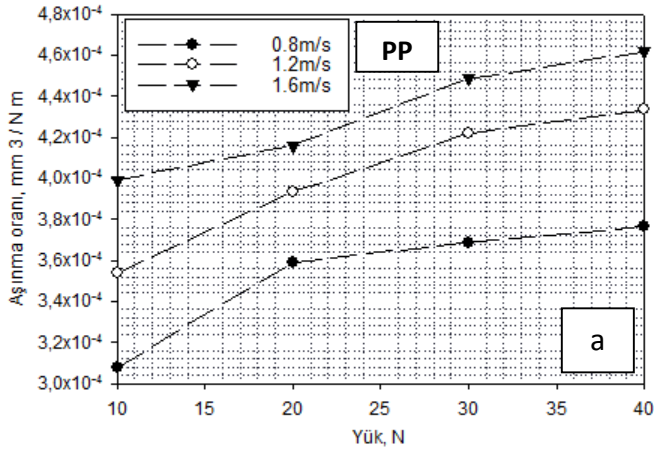
h)'de ise katkısız PP polimeri ile %0.1, %1 ve %2 oranlarında ÇDKNT katkılı PP nanokompozitlerin uygulanan yük ve kayma hızına bağlı olarak aşınma oranları ve ISO diyagramları (counter) diyagramları

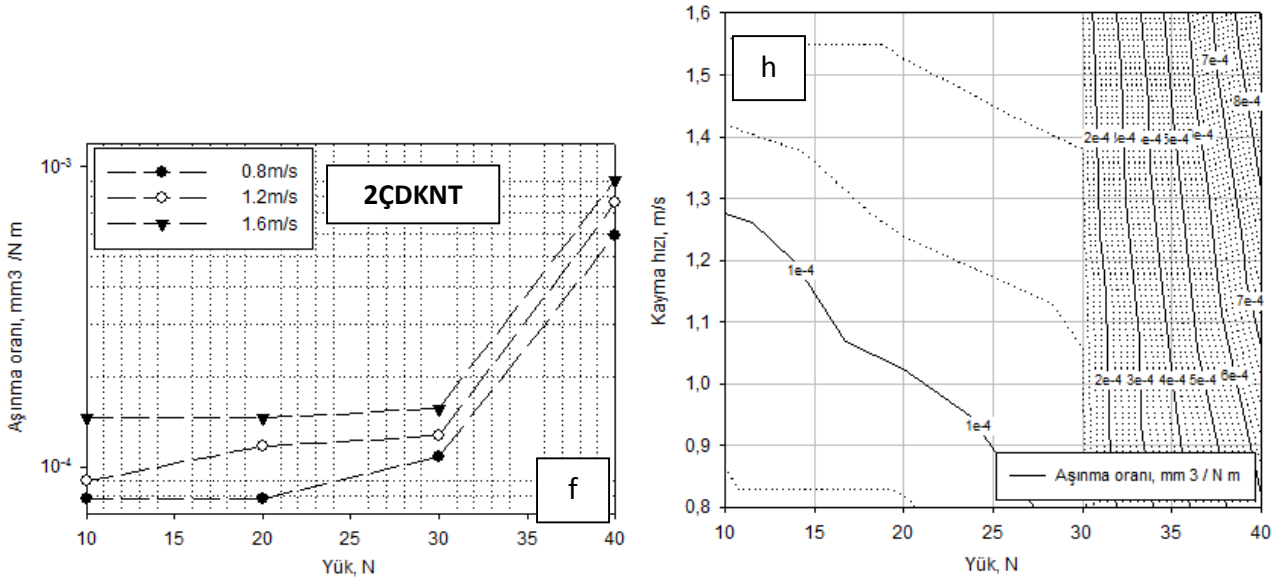
verilmiştir. Şekil 3 (a,c,e,g)'deki yük-aşınma oranı grafikleri incelendiğinde hem katkısız PP hem de ÇDKNT katkılı PP nanokompozitlerde artan yüke bağlı olarak aşınma oranının arttığı belirlenmiştir. Bu artış katkısız PP polimeri için %22, 0.1ÇDKNT polimeri için %30, %1ÇDKNT polimeri için %46 ve 2ÇDKNT polimeri için %89 oranlarında elde edilmiştir. Kayma hızının 0.8m/s'den 1.6m/s'ye artırılması ile uygulanan yüke bağlı olarak, PP polimerinin aşınma oranı %15-29, 0.1ÇDKNT polimerinin %23-33, 1ÇDKNT polimerinde %20-57 ve 2ÇDKNT polimerinde ise %44-85 oranlarında artmıştır. Şekil 3 (b,d,f,h)'de ise katkısız PP polimeri ile %0.1, %1 ve %2 oranlarında ÇDKNT katkılı PP nanokompozitlerin kayma hızı ve uygulanan yüke bağlı olarak ISO diyagramları verilmiştir. Bu diyagramlar, polimerin uygun aşınma direnci için doğru çalışma şartlarının seçiminde ve kayma hızı ile uygulanan yük gibi parametrelerin belirlenerek polimerin aşınma oranının kontrolüne olanak sağlamaktadır. Ayrıca, Şekil 3 (b,d,f,h)'deki grafikler incelendiğinde uygulanan yük ve kayma hızının aşınma oranının şekillenmesinde önemli rol oynadığı belirlenmiştir. Genel olarak, aşınma oranı 10^{-4} mm³/Nm olarak belirlenmiştir. Uygulanan kayma hızı ve yük aralıklarında, en yüksek aşınma oranı 1.6m/s kayma hızı ve 40N yük altında 4.61×10^{-4} mm³/Nm değeri ile katkısız PP polimerinde elde edilirken en düşük aşınma oranı 0.8m/s kayma hızı ve 10N yük altında 7.82×10^{-5} mm³/Nm değeri ile %2 oranında ÇDKNT katkılı PP nanokompozitinde elde edilmiştir.

Tablo 2

PP ve Kompozitlerin Aşınma Oranı Sonuçları

Malzeme	Yük, N	Kayma hızı, m/s		
		0.8m/s	1.2m/s	1.6m/s
		Aşınma oranı, mm ³ /Nm		
PP	10	3.0787E-4	3.5348E-4	3.9909E-4
	20	3.5918E-4	3.9339E-4	4.1619E-4
	30	3.6868E-4	4.2189E-4	4.4850E-4
	40	3.7628E-4	4.3330E-4	4.6180E-4
0.1ÇDKNT	10	2.7273E-4	3.0682E-4	3.6364E-4
	20	2.9545E-4	3.5227E-4	3.8636E-4
	30	3.0682E-4	3.5606E-4	3.9015E-4
	40	3.5511E-4	4.0057E-4	4.3750E-4
0.2ÇDKNT	10	2.6460E-4	2.7273E-4	2.8409E-4
	20	2.7841E-4	3.0682E-4	3.5227E-4
	30	2,9545E-4	3.2197E-4	3.6364E-4
	40	3,2955E-4	3.5227E-4	3.7216E-4
0.3ÇDKNT	10	2,1348E-4	2.3596E-4	2.6966E-4
	20	2.3034E-4	2.5843E-4	2.7528E-4
	30	2.3221E-4	2.8090E-4	3.2210E-4
	40	2.9213E-4	2.9775E-4	3.3146E-4
1ÇDKNT	10	1.5730E-4	1.6854E-4	2.1348E-4
	20	1.7416E-4	2.1348E-4	2.3034E-4
	30	1.7603E-4	2.1723E-4	2.7715E-4
	40	2.3034E-4	2.4438E-4	2.7809E-4
2ÇDKNT	10	7.8212E-5	8.9385E-5	1.4525E-4
	20	7.8212E-5	1.1732E-4	1.4525E-4
	30	1.0801E-4	1.2663E-4	1.5642E-4
	40	1.4804E-4	1.8994E-4	2.2626E-4





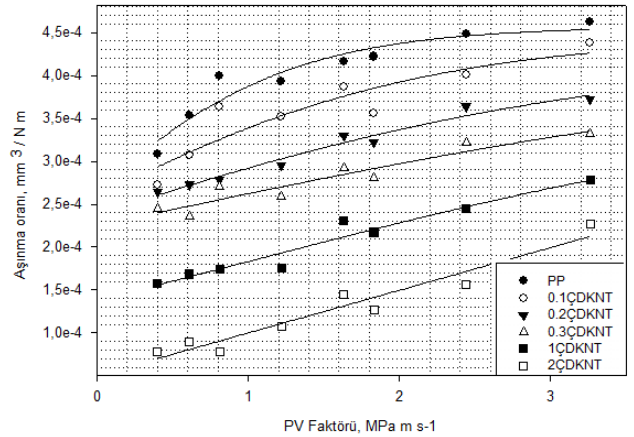
Şekil 3. PP Nanokompozitlerin Yük ve Kayma Hızı ile Aşınma Oranı Değişimi ve ISO (Counter) Diyagramları

Şekil 4'te katkısız PP polimeri ile ÇDKNT katkılı PP nanokompozitlerin aşınma oranı üzerine değişen yük ve kayma hızının etkisini gösteren PV faktörü grafiği verilmiştir. PV faktörü, Denklem 2'de verilen formül ile hesaplanmaktadır (Abdelbary, 2015).

$$PV \text{ faktörü} = \frac{\text{yük} \times \text{kayma hızı}}{\text{pim alanı}} \quad (2)$$

Şekilde görüldüğü gibi aşınma oranı uygulanan yük ve kayma hızından etkilenmiştir. Artan PV faktörü ile aşınma oranının arttığı belirlenmiştir. Aynı zamanda, aşınma oranının ÇDKNT miktarına göre değiştiği de görülmektedir. Katkısız PP polimerine ilave edilen ÇDKNT ve artan ÇDKNT miktarına bağlı olarak aşınma oranının azaldığı belirlenmiştir. Bu azalma 0.1ÇDKNT, 0.2ÇDKNT, 0.3ÇDKNT, 1ÇDKNT ve 2ÇDKNT polimerleri için sırasıyla %18, %31, %50, %94 ve %233 oranlarında elde edilmiştir. Qui, Chen, Yongzhen, Lihua ve Xuguang (2013) sürtünme prosesi süresince polimer matris içerisine ilave edilen ÇDKNT katkının yük taşıma kapasitesini artırması nedeniyle aşınma direncinin geliştiğini belirtmişlerdir. Ayrıca, uygulanan kayma hızı ve yüke bağlı olarak artan aşınma oranı sürtünme kaynaklı oluşan ısıya bağlıdır. Sürtünme sırasında harcanan enerjinin çoğunluğu ısıya dönüşür ve kayma yüzeyinde yüksek sıcaklık oluşarak polimerin yumuşamasına sebep olur (Zhang, Pei ve Wang, 2008). Ayrıca, Li ve Liang (2010) spesifik aşınma oranının temas yüzeyinde oluşan film tabakasına bağlı olduğunu belirtmiştir. Jian ve Liqiang (2010) yüzey sertliğinin aşınma direncini etkileyen en önemli parametre olduğunu belirtmiştir. KNT ile artan sertliğin aşınma direncini artıracakı belirtilmiştir. Bu çalışmada da PP

polimerine ilave edilen ÇDKNT katkısı ile kompozitlerin Shore D sertlik değerlerinin arttığı ve aşınma direncinin şekillenmesinde rol oynadığı düşünülmektedir.

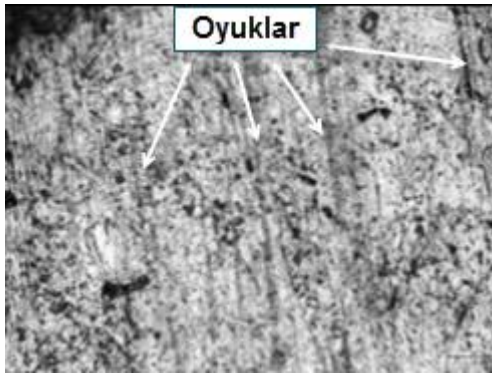


Şekil 4. PV Faktörüne Bağlı Olarak Aşınma Oranı Değişimi

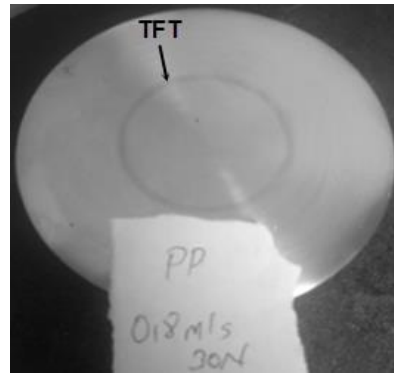
Şekil 5'te ise aşınma testleri sonucunda disk ve pim yüzeylerinden alınmış optik mikroskop resimleri verilmiştir. Makro-disk resimleri incelendiğinde, tüm numunelerde transfer film tabakası (TFT) adı verilen ince bir film tabakasının oluştuğu gözlenmiştir. Oluşan bu transfer film tabakası PP polimerinin sürtünme katsayısı ve aşınma oranı özelliklerini etkilemiştir. Pim resimleri incelendiğinde ise katkısız PP polimerinin yüzeyinde oyukların oluştuğu belirlenmiştir. Bu oyuklar ÇDKNT ilavesi ve oluşan transfer film tabakası nedeniyle kaybolmuştur. Çalışma sonucunda, sürtünme katsayısının ve aşınma oranının kontrol edilmesinde

çok duvarlı karbon nanotüp katkının önemli bir katkı yağlayıcı olduğu belirlenmiştir. Chen ve diğ. (2003) KNT katkılı PTFE kompozitlerinde, KNT katkının kompozitten ayrıldığını ve kompozit ile çelik disk arasındaki arayüze transfer olduğunu belirtmiştir. KNT katkının, temas halindeki yüzeyler arasında teması

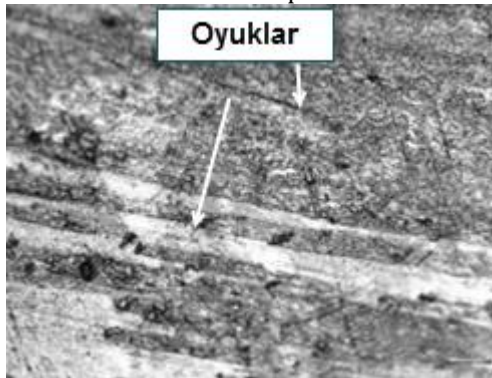
kesen ve aşınma oranı ile sürtünme katsayısını azaltan partiküller gibi görev yaptığını belirtmişlerdir. Sürtünme katsayısındaki azalmayı KNT katkının kendinden yağlamalı özelliğe sahip olmasına bağlamışlardır.



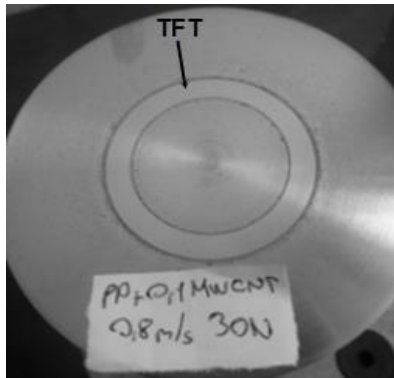
PP-Mikro-pim



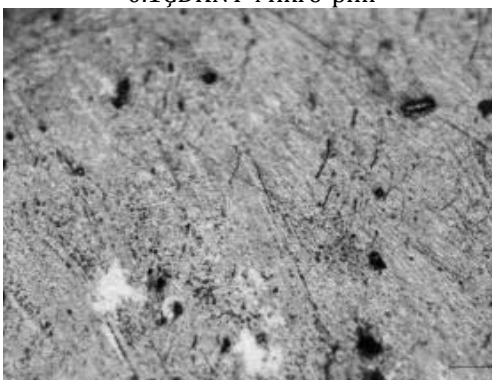
PP-Makro-Disk



0.1ÇDKNT-Mikro-pim



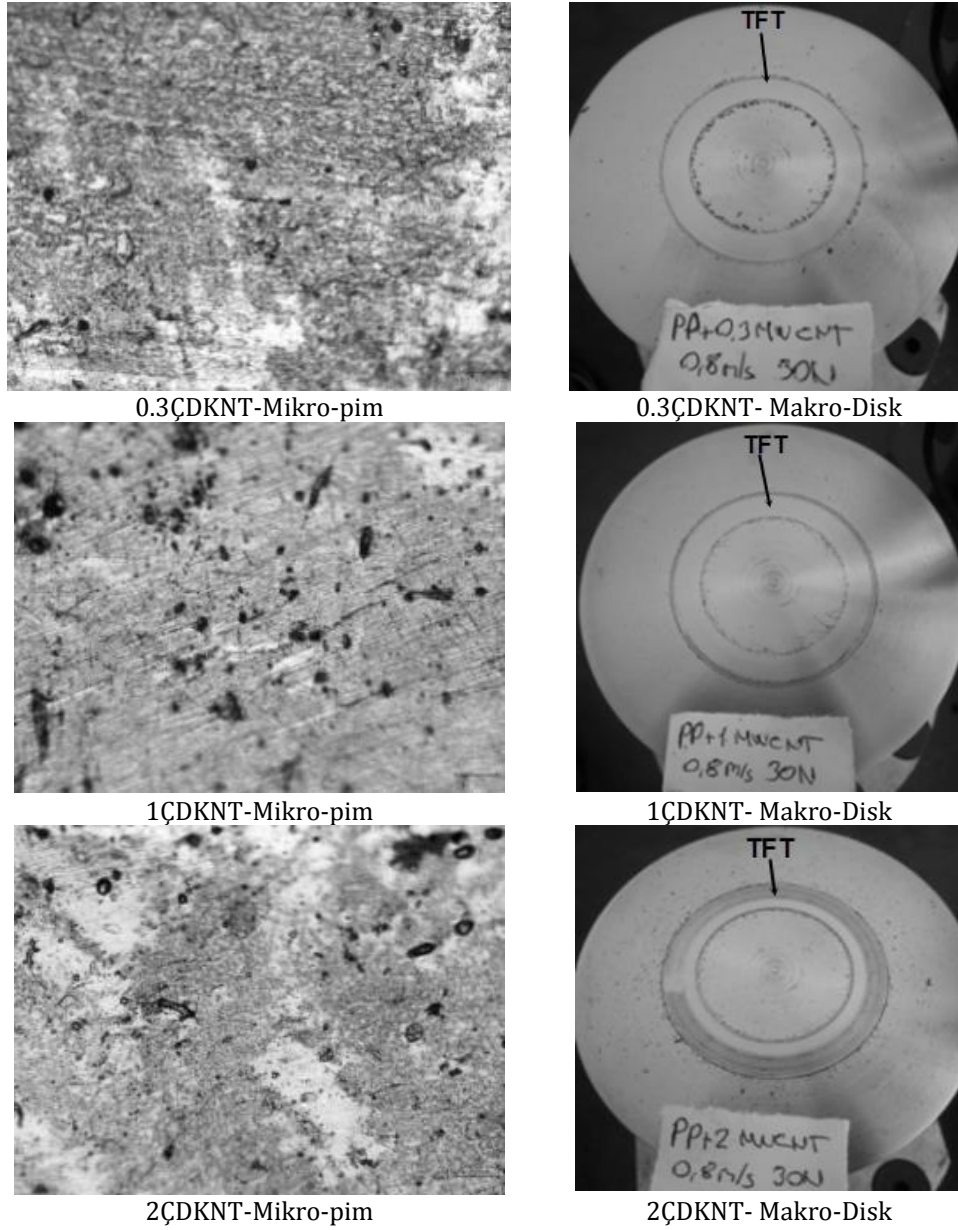
0.1ÇDKNT- Makro-Disk



0.2ÇDKNT-Mikro-pim



0.2ÇDKNT- Makro-Disk



Şekil 5. PP ve PP Nanokompozitlerin Makro Disk ve Aşınmış Yüzey Resimleri (Yük:30N, Hız:0.8m/s)

5. Sonuçlar

Farklı kayma hızı ve yük altında ÇDKNT katkılı PP kompozitlerin tribolojik özelliklerinin incelendiği çalışma sonucunda aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

PP nanokompozitlerin sürtünme katsayısı ve aşınma oranları, uygulanan yük ve kayma hızının artması ile artmıştır. Sürtünme katsayısını etkileyen en önemli parametrenin uygulanan yük olduğu belirlenmiştir. Genel olarak, aşınma oranı 10^{-4} mm³/Nm olarak belirlenmiştir. Uygulanan kayma hızı ve yük aralıklarında, en yüksek aşınma oranı PP polimerinde elde edilirken en düşük aşınma oranı %2 oranında ÇDKNT katkılı PP nanokompozitinde elde edilmiştir.

Disk yüzeyinde oluşan transfer film tabakası PP nanokompozitlerin gerek sürtünme katsayısı gerekse aşınma oranının şekillenmesinde önemli rol oynamıştır.

Çıkar Çatışması

Yazar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

Kaynaklar

- Abdelbary, A. (2015). *Wear of Polymers and Composites*. Elsevier Ltd. Doi: <https://doi.org/10.1016/C2014-0-03367-9>
- Chawla, R. (2018). Sliding tribological behavior of carbon nanotube/natural rubber composites. *Tribology in Industry*, 40(2), 263-273. Doi: <https://doi.org/10.24874/ti.2018.40.02.10>
- Chen, W. X., Li, F., Han, G., Xia, J. B., Wang, L. Y., Tu, J. P. & Xu, Z. D. (2003). Tribological behavior of carbon-nanotube-filled PTFE composites. *Tribology Letters*, 15(3), 275-278. Doi: <https://doi.org/10.1023/A:1024869305259>
- Cornwell, C. F. & Wille, L. T. (1997). Elastic properties of single-walled carbon nanotubes in compression. *Solid State Communications*, 101, 555-558. Doi : [https://doi.org/10.1016/S0038-1098\(96\)00742-9](https://doi.org/10.1016/S0038-1098(96)00742-9)
- Du, J. H. Bai, J. & Cheng, H. M. (2007). The present status and key problems of carbon nanotube based polymer composites. *eXPRESS Polymer Letters*, 1(5), 253-273. Doi: <https://doi.org/10.3144/expresspolymlett.2007.39>
- Guofang, G., Yang, H. & Fu, X. (2004). Tribological properties of kaolin filled UHMWPE composites in unlubricated sliding, *Wear*, 256(1-2), 88-94. Doi: [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(03\)00394-6](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(03)00394-6)
- Jian, L. & Liqiang, Q. Z. (2010). The Research on the mechanical and tribological properties of carbon fiber and carbon nanotube-filled PEEK composite. *Polymer Composites*, 31(8), 1315-1320. Doi : <https://doi.org/10.1002/pc.20916>
- Jin, Z. X., Pramoda, K. P., Xu, G. Q. & Goh, S. H. (2001). Dynamic mechanical behavior of melt-processed multi-walled carbon nanotube/poly(methyl methacrylate) composites. *Chemical Physics Letters*, 337, 43-47. Doi : [https://doi.org/10.1016/S0009-2614\(01\)00186-5](https://doi.org/10.1016/S0009-2614(01)00186-5)
- Irena, B., Rumiana, K., Manuel, M. P., Ana, V. L. & Strashimir, D. (2016). Thermal, mechanical and viscoelastic properties of compatibilized polypropylene/multi-walled carbon nanotube nanocomposites. *Journal of Elastomers and Plastics*, 48(7), 576-599. Doi : <https://doi.org/10.1177/0095244315613617>
- Kanagaraj, S., Varanda, FR., Zhil'tsova, T. V., Oliveira, M. S. A & Simoes, J. A. O. (2007). Mechanical properties of high density polyethylene/carbon nanotube composites. *Composites Science and Technology*, 67(15-16), 3071-3077. Doi : <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2007.04.024>
- Kang, C. H., Yoon, K. H., Park, Y. B., Lee, D. Y. & Jeong, S. S. (2010). Properties of polypropylene composites containing aluminium/multi-walled carbon nanotubes. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 41, 919-926. Doi : <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2010.03.011>
- Kim, P., Shi, L., Majumdar, A. & McEuen P. L. (2001). Thermal transport measurements of individual multiwalled nanotubes. *Physical Review Letters*, 87(21), 215502-4. Doi: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.87.215502>
- Li, J. & Liang, Z.N. (2010). Sliding Wear Performance of TiO₂/Short Carbon Fiber/Polyamide 66 Hybrid Composites. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 49, 848-852. Doi: <https://doi.org/10.1080/03602551003773148>
- Lijima, S. (1991). Heical microtubules of graphitic carbon. *Nature*, 354, 56-58. Doi : <https://doi.org/10.1038/354056a0>
- Mertens, A. J. & Senthilvelan, S. (2016). Mechanical and tribological properties of carbon nanotube reinforced polypropylene composites. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of materials: Design and applications*, 232(8),669-680. Doi : <https://doi.org/10.1177/1464420716642620>
- Minhaeng, C. (2008). The flexural and tribological behavior of multi-walled carbon nanotube-reinforced polyphenylene sulfide composites. *Materials Transactions*, 49(12), 2801-2807. Doi : <https://doi.org/10.2320/matertrans.MRA2008262>
- Pan, Y., Li, L., Chan, S. H. & Zhao, J. (2010). Correlation between dispersion state and electrical conductivity of MWCNTs/PP composites prepared by melt blending. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 41, 419-426. Doi : <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2009.11.009>
- Po-Hsiang, W., Sushanta, G., Prabhakar, G., Nikhil, V. & Satish, K. (2016). Polypropylene nanocomposites with polymer coated multiwall carbon nanotubes. *Polymer*, 100, 244-258. Doi : <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2016.07.070>
- Prashanthe, K., Soulestin, J., Lacrampe, M. F., Claes, M., Dupin, G. & Krawczak, P. (2008). Multiwalled carbon nanotube filled polypropylene nanocomposites based on masterbatch route: Improvement of dispersion and mechanical properties through PP-g-MA addition. *Express Polymer Letters*, 2, 735-745. Doi: <https://doi.org/10.3144/expresspolymlett.2008.87>
- Sandler, J., Broza, G., Nolte, M., Schulte, K., Lam, Y. M. & Shaffer, M. S. P. (2007). Crystallization of carbon nanotube and nanofiber polypropylene composites. *Journal of Macromolecular Science, Part: B*, B42, 479-488. Doi : <https://doi.org/10.1081/MB-120021576>
- Sudheera, M., Hemantha, K., Rajua, K. & Thirumaleshwara, B. (2014). Enhanced Mechanical

- and Wear Performance of Epoxy/glass Composites with PTW/Graphite Hybrid Fillers. *Procedia Materials Science*, 6, 975-987. doi : <https://doi.org/10.1016/j.mspro.2014.07.168>,
- Qiu, L., Chen, Y., Yongzhen, Y., Lihua, X. & Xuguang, L. (2013). A Study of Surface Modifications of Carbon Nanotubes on the Properties of Polyamide66/Multiwalled Carbon Nanotube Composites. *Journal of Nanomaterials*, 2013, 1-8. Doi : <https://doi.org/10.1155/2013/252417>
- Xu, X. J., Thwe, M. M., Shearwood, C. & Liao, K. (2002). Mechanical properties and interfacial characteristics of carbon-nanotube-reinforced epoxy thin films. *Applied Physics Letters*, 81, 2833-2835. Doi: <https://doi.org/10.1063/1.1511532>
- Yakobson, B. I., Brabec, C. J. & Bernholc, J. (1996). Nanomechanics of carbon tubes: instabilities beyond linear response. *Physical Review Letters*, 76, 2511-2514. Doi: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.76.2511>
- Yang, Z., Dong, B., Huang, Y., Liang, L., Feng-Yuan, Y. & Hu-Lin, L. (2005a). A study on carbon nanotubes reinforced poly (methyl methacrylate) nanocomposites. *Materials Letters*, 59(7),2128-2132. Doi : <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2005.02.046>
- Yang, Z., Dong, B., Huang, Y., Liang, L., Feng-Yuan, Y. & Hu-Lin, L. (2005b). Enhanced wear resistance and micro-hardness of polystyrene nanocomposites by carbon nanotubes. *Materials Chemistry and Physics*, 94, 109-113. Doi : <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2005.04.029>
- Yang, B. X., Shi, J. H., Pramoda, K. P. & Goh, S. H. (2008). Enhancement of the mechanical properties of polypropylene using polypropylene-grafted multiwalled carbon nanotubes. *Composites Science and Technology*, 68, 2490-2497. Doi : <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2008.05.001>
- Yuanhao, Y., Jingfu, S., Gai, Z. & Qingjun, D. (2020). Effect of rare earth oxide on the mechanical and tribological properties of polyimide nanocomposites. *Industrial Lubrication and Tribology*.72(3),433-437. Doi : <https://doi.org/10.1108/ILT-08-2019-0315>
- Zaikov, G. E., Rakhimkulov, A. D., Lomakin, S. M., Dubnikova, I. L., Shchegolikhin, A. N., Davidov, E. Y. & Kozłowski, R. (2010). Thermal degradation and combustion behaviour of polypropylene/MWCNT composites. *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 523, 106-119. Doi : <https://doi.org/10.1080/15421401003726543>
- Zhang, X., Pei, X. & Wang, Q. (2008). Friction and Wear Properties of Combined Surface Modified Carbon Fabric Reinforced Phenolic Composites. *European*
- Polymer Journal*, 44(8), 2551-2557. Doi : <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2008.06.013>