



## Çok duvarlı karbon nanotüp katkılı poliamit 6 polimerinin mekanik özelliklerinin incelenmesi

### Gözde KUŞ

Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İleri Teknolojiler ABD, KÜTAHYA  
gozde\_kus88@hotmail.com ORCID:0000-0003-0964-5967

### Murat KOYUNBAKAN

Dumlupınar Üniversitesi, Simav Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Simav/KÜTAHYA  
murat.koyunbakan@dpu.edu.tr

### Salih Hakan YETGİN\*

Dumlupınar Üniversitesi, Simav Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Simav/KÜTAHYA  
hakan.yetgin@dpu.edu.tr ORCID: 0000-0002-6068-9204 Tel: (274) 5137917 (5092)

### Ferhat YILDIRIM

Dumlupınar Üniversitesi, Simav Teknoloji Fakültesi, Endüstriyel Tasarım Mühendisliği Bölümü, Simav/KÜTAHYA  
ferhat.yildirim@dpu.edu.tr ORCID:0000-0002-0524-4050

### Volkan ESKİZEYBEK

Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Malzeme Bil. ve Müh. Böl, ÇANAĞKALE  
veskizeybek@comu.edu.tr ORCID:0000-0002-5373-0379

### Abdurrahman GENÇ

Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İleri Teknolojiler ABD, KÜTAHYA  
abdurrahman.genc@ogr.dpu.edu.tr ORCID:0000-0003-1342-6652

Geliş: 15.01.2020, Revizyon: 11.05.2019, Kabul Tarihi: 05.09.2019

### Öz

Bu çalışmada, poliamit 6 (PA6) polimerine çok duvarlı karbon nanotüp (ÇDKNT) takviye edilerek PA6/ÇDKNT nanokompozitleri üretilmiştir. Elde edilen nanokompozitlerde değişen ÇDKNT miktarının çekme, eğilme ve darbe dayanımlarına etkisi incelenmiştir. ÇDKNT nanotakviyelerinin PA6 matrisindeki homojen dağılımlarının sağlanması için PA6/ÇDKNT karışımı çift vidalı ekstruderden geçirilmiştir. Elde edilen karışım enjeksiyonla kalıplama tekniği kullanılarak, çekme, darbe ve eğilme numunelerinin üretiminde kullanılmıştır. Çalışma sonucunda, ÇDKNT miktarının PA6 matrisinin mekanik özellikleri üzerinde önemli etkisi olduğu belirlenmiştir. Buna göre, artan ÇDKNT miktarına bağlı olarak PA6/ÇDKNT nanokompozitlerin çekme ve eğilme dayanımları ile elastisite modülleri sırasıyla %5.79, %16 ve %7.8 oranlarında artarken darbe dayanımı ve şekil değiştirme değerleri sırasıyla %11.2 ve %988 oranlarında azalmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Poliamit 6, Çok duvarlı karbon nanotüp, mekanik özellikler

\* Yazışmaların yapılacağı yazar:

## Giriş

Endüstriyel uygulamalarda polimer ve polimer kompozitlerin kullanımı hızla artmaktadır. Endüstriyel ürünlerin tasarımında termoplastikler, hafif olmaları, kimyasallara karşı dayanıklı olmaları, kolay işlenebilmeleri ve geri kazanılabilmeleri gibi özelliklerinden dolayı daha çok tercih edilmeye başlanmıştır. Ancak termoplastiklerin mekanik, termal ve yanmazlık gibi bazı fiziksel özelliklerinin yetersiz oluşu bir dezavantaj oluşturmaktadır. Poliamit (PA) polimeri, geleneksel malzemeler ile karşılaştırıldığında yüksek dayanım/ağırlık oranı, korozyon direnci, UV ve gama ışınlarına karşı direnç, oldukça basit ve ekonomik üretim prosesleri nedenleriyle mühendislik plastikleri içerisinde en çok kullanılan yarı-kristalin bir polimer türüdür (Humın vd., 2006; Renê vd., 2016). Ancak, polar amit grupların bulunması sebebiyle yüksek nem alma kapasitesi, düşük ölçü kararlılığı, düşük ısı sapma sıcaklığı, düşük sıcaklıklarda düşük darbe dayanımına sahip olması ve kolay yanabilmesi PA polimerinin kullanım alanlarını sınırlamaktadır (Renê vd., 2016; Jiang, 2008; Yousif ve El-Tayeb, 2008; Kumar ve Kanagaraj, 2016).

Son yıllarda termoplastiklerin fiziksel özelliklerini iyileştirmek için yapıya karbon esaslı ilave edilen nanoparçacıkların ilave edilmesi (karbon nanotüp ve grafen oksit) önemli malzeme geliştirme stratejilerinden biri haline gelmiştir (Patti vd., 2015; Yasser, 2015). Karbon nanotüp (KNT), üstün termal ve elektrik iletkenliği ve mekanik özelliklerinin yanı sıra bir boyutlu (1D) morfolojiye sahip olması nedeniyle polimerlerin takviye edilmesinde sıklıkla tercih edilmektedir (Bhagwan vd., 2012; Zanjanijam, 2014; Kartel vd., 2016; Park, ve Bandaru, 2010). KNT katkı polimer nanokompozitler, polimerizasyon, çözelti karışımı veya ergiyik karıştırma (ekstrüzyon) gibi yöntemler kullanılarak üretilebilmektedir. Bu üretim yöntemleri arasında, özellikle ergiyik karıştırma yöntemi, solventsiz olması, hızlı ve büyütülebilir üretime izin vermesi, düşük maliyetli olması ve çevresel faydaları nedeniyle termoplastik nanokompozitlerin üretiminde

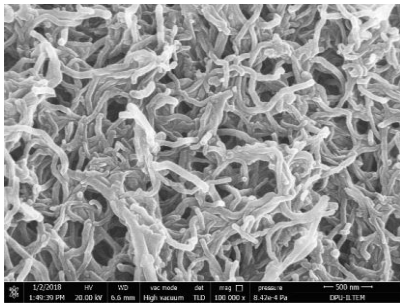
yoğun olarak kullanılmaktadır (Patti vd., 2015). Zou ve arkadaşları (2004) çift vidalı ekstrüzyon ve enjeksiyon kalıplama yöntemlerini kullanarak ürettikleri çok duvarlı KNT (ÇDKNT) katkı yüksek yoğunluklu polietilen (YYPE) kompozitin izod darbe dayanımını inceledikleri çalışmada %1 ÇDKNT ilavesi ile darbe performansının iyileştiğini göstermişlerdir. Benzer bir çalışmada, Kanagari ve arkadaşları (2007) enjeksiyon kalıplama yöntemi ile ürettikleri KNT katkı YYPE nanokompozitinde, artan KNT miktarına bağlı olarak mekanik özelliklerin arttığını belirtmişlerdir. Bunun sebebi olarak KNT ve YYPE arasındaki ara yüzeyde meydana gelen kimyasal etkileşimler sayesinde yük transferinin iyileşmesine bağlanmıştır. Xiao ve arkadaşları (2007) ise ÇDKNT katkı alçak yoğunluklu polietilen (AYPE) nanokompozitinde, ÇDKNT miktarının % 10 civarında tutulduğunda, elastisite modülünün %89 ve çekme dayanımının %56 oranında arttığını belirtmişlerdir. Ogasawara ve arkadaşları (2004) in-situ polimerizasyon yöntemiyle hazırladıkları poliimit (PI)/ÇDKNT nanokompozitinde, ÇDKNT ilavesi ile elastisite modülünün ve akma dayanımının arttığını belirtmişlerdir. Liu ve arkadaşları (2007) polieterimit (PEI)/ÇDKNT kompozitinin termal ve mekanik özelliklerini inceledikleri çalışma sonucunda, elastisite modülünün ise %250 oranında arttığını belirtmişlerdir. Manchado ve arkadaşları (2005) ise tek duvarlı karbon nanotüp (TDKNT) katkı izostatik polipropilen (PP) polimerinin termal ve mekanik özelliklerini inceledikleri çalışmalarında, düşük miktarlarda TDKNT katkısının kristal yapıyı değiştirmeden kristallenme oranını artırdığını ve artan TDKNT miktarına bağlı olarak da elastisite modülü ve çekme dayanımının arttığını belirtmişlerdir. Grady ve arkadaşları da (2002) KNT katkı PP polimerinin kristallenme davranışlarını inceledikleri çalışmada, KNT katının mevcut  $\alpha$ -formuna göre daha az tercih edilen  $\beta$ -formunun oluşumuna katkı sağladığını belirtmişlerdir. KNT katının, PP polimerinin kristallenme oranını artırdığı ve PP polimerinde çekirdekleyici ajan gibi davrandığını belirtmişlerdir. Kearns ve Shambaugh (2002)

%1 oranında TDKNT katkılı PP fiberlerin çekme dayanımının %40, elastisite modülünün ise %55 oranında arttığını belirtmişlerdir. Meincke ve arkadaşları (2004) çift vidalı ekstruder ile ürettikleri KNT katkılı PA6 polimerinin mekanik ve elektriksel özelliklerini inceledikleri çalışmada, düşük katkı oranlarında elektriksel iletkenliğin oluştuğunu ve elastisite modülünün %27 oranında arttığını belirtmişlerdir.

Bu çalışmada, farklı oranlarda ÇDKNT katkılı PA6 polimeri ekstrüzyon ve enjeksiyon yöntemleri kullanılarak üretilmiştir. PA6 polimerine ilave edilen KNT katkının çekme, eğilme ve darbe performansı gibi mekaniksel özellikler üzerine etkisi incelenmiştir.

## Materyal ve Yöntem

Bu çalışmada ekstrüzyon ve enjeksiyon kalıplamaya uygun NYLEM® 6 (EMAŞ A.Ş., Bursa/Türkiye) poliamit 6 polimeri kullanılmıştır. Takviye elemanı olarak ise Detsan A.Ş (Türkiye) firmasından temin edilen çok duvarlı karbon nanotüp (ÇDKNT) kullanılmıştır. ÇDKNT, % 97'den daha yüksek oranda saflığa sahiptir. Seçilen ÇDKNT'lerin ortalama dış çapı 10-20 nm, uzunluğu 10-30 µm ve yüzey alanı >200 m<sup>2</sup>/g'dır. Şekil 1'de, ÇDKNT katkının taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüsü verilmiştir.



**Şekil 1.** ÇDKNT katkının taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüsü.

Ekstrüzyon prosesi öncesinde nemi almak için PA6 polimeri ve ÇDKNT, 100 °C'de ve 4 saat boyunca kurutulmuştur. ÇDKNT katkılı PA6 nanokompozitlerin üretimi 6 adet ısıtma bölgesi,

22 mm vida çapına sahip ve L/D oranı 32 olan çift vidalı ekstruder kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Üretim esnasında vida boyunca sıcaklık dağılımı 220-230-235-240-245-245 °C olarak kullanılmıştır. PA6 polimeri içerisine ağırlıkça %0.1, 0.2 ve 0.3 oranlarında ÇDKNT katılarak PA6 nanokompozitler üretilmiştir. Kampaund üretim yöntemi ile granül haline getirilen PA6 polimer nanokompozit granüller Hastec Borche marka enjeksiyon kalıplama makinesi ile kalıplanmıştır. Kalıplama işlemi için kullanılan kalıplar ve kalıplama sonrası elde edilen numuneler Şekil 2'de verilmiştir. Üretimler Gama-Alfa Plastik (Gebze) firmasında gerçekleştirilmiştir. Üretim öncesinde, PA6 polimer nano kompozitlerin nemi alınması için 100 °C ve 4 saat boyunca etüv fırınında bekletilmiştir. Enjeksiyon kalıplama ile üretimlerde Tablo 1'de verilen üretim parametreleri kullanılmıştır.



**Şekil 2.** Kullanılan kalıplar ve kalıplama sonrası elde edilen numuneler.

**Tablo 1.** Enjeksiyon kalıplama parametreleri

Parametreler	Giriş	1. Bölge	2. Bölge	3. Bölge	4. Bölge	5. Bölge	6. Bölge
Enjeksiyon ısıları	---	250 °C	255 °C	260 °C	265 °C	270 °C	270 °C
Enjeksiyon Basıncı		110 Bar					
Enjeksiyon Hızı		66 mm/dk.					
Ütüleme Basıncı		44 Bar					
Çevrim Süresi		40 Saniye					
Mal AlmaMesafesi		9 mm					
Kalıp		Ç oklu Numune Kalıbı					

Çekme deneyleri, ZWICK/ROELL ICO711001 cihazı kullanılarak, Gama Alfa Plastik San. ve Tic. A.Ş. laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Deneylerde TS ISO 527 (ASTM D 638)

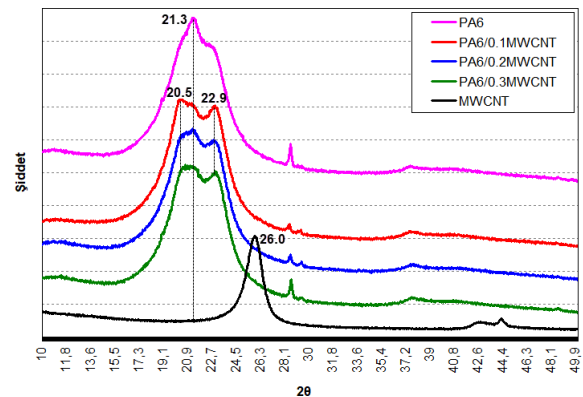
standardına uygun olarak hazırlanmış çekme hızı 5 mm/dak olarak sabitlenmiş ve deneyler oda sıcaklığında ( $23 \pm 2$  °C) yapılmıştır. Çekme deneylerinin sonucunda çekme mukavemeti, şekil değiştirme ve elastisite modülü değerleri ilgili standarda göre hesaplanmıştır. Eğilme testleri Gama Alfa Plastik San. ve Tic. A.Ş. laboratuvarında bulunan ZWICK/ROELL 1C0711002 marka ve modeldeki çekme ve eğme cihazı ile standartlara uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Katkısız PA6 polimeri ve ÇDKNT katkılı PA6 nanokompozitlerine, TS1005 standardına uygun olarak izod darbe deneyleri uygulanmıştır. Darbe testi için ZWICK/ROELL HIT 5-5P marka dijital göstergeli bir darbe deney cihazı kullanılmıştır. İzod darbe deneyleri, enjeksiyon kalıplama ile üretilen 4x10x80 mm ebatlarındaki numuneler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Darbe testinde,  $2,75 \text{ kJ/m}^2$  lik çekiç kullanılmıştır. Tüm mekanik testlerde en az 5'er adet numune ile testler gerçekleştirilmiş ve sonuçların ortalamaları alınmıştır. X-ışını kırınım (XRD) testleri 45 kV ve 40 mA' de çalışabilen Panalytical (Empyrean) Model X ışını difraktometre cihazı ile  $\lambda=1.5405 \text{ \AA}$  dalga boyuna sahip  $\text{CuK}\alpha$  ışınları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Tarama hızı dakikada  $2^\circ$  olacak şekilde  $10^\circ$  ile  $50^\circ$  arasında yapılmıştır.

## Deney sonuçları

### X-ışını kırınım (XRD) testi sonuçları

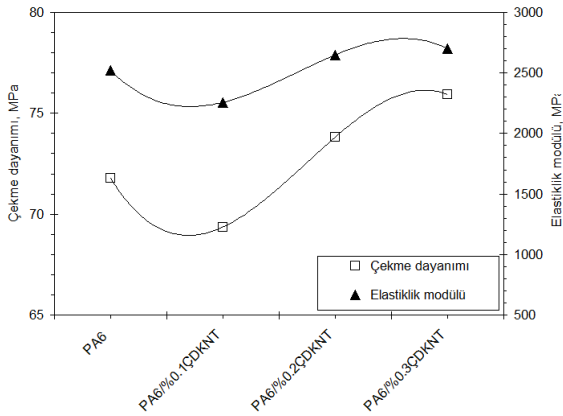
Şekil 3'de, ÇDKNT, saf PA6 polimeri ile PA6/ÇDKNT nanokompozitlerin XRD grafiği verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi  $2\theta=21.3^\circ$  de kuvvetli pik PA6 polimerinin  $\gamma$ -formu oluşturduğunu göstermektedir. PA6 içerisine ÇDKNT ilavesi ile kristal yapı değişmiş ve  $20.5^\circ$  ve  $22.9^\circ$  piklerinin işaret ettiği üzere PA6'nın  $\alpha$ -formu olduğu belirlenmiştir. ÇDKNT katkısı,  $\alpha$ -formunu daha şiddetli hale getirirken  $\gamma$ -formunun şiddetini azaltmıştır. Ayrıca, karbon nanotüplerin karakteristik pik şiddeti  $2\theta:26.0^\circ$  de elde edilmiştir. Khanna ve Kuhn'a (1997) göre, poliamid 6 polimeri,  $\alpha$ -monoklinik ve  $\gamma$ -pseudoheksagonal olmak üzere iki farklı kristalografik form alabilmektedir.  $\alpha$ -formunda hidrojen bağları anti-paralel zincirler arasında,  $\gamma$ -formunun

hidrojen bağları ile paralel zincirler arasında olduğu belirtilmiştir. Nasir ve arkadaşları (2014), PA6 polimerinin XRD analizleri sonucunda,  $2\theta:21.28^\circ$  de oluşan kuvvetli pikin  $\gamma$ -formu,  $2\theta:20.48^\circ$  (200) ve  $2\theta:23.24^\circ$  de (002,022) oluşan iki küçük pikin ise  $\alpha$ -formu olduğunu belirtmişlerdir. Katkısız PA6 polimerinde  $\gamma$ -formu ana faz olmak üzere  $\alpha$ -formu ve  $\gamma$ -formundan oluştuğunu belirtmişlerdir.  $\alpha$ -formunun anti-paralel olarak paketlenmiş hidrojen bağlı zincir tabakalarından oluşan termodinamik olarak kararlı bir faz olduğu,  $\gamma$ -formunun ise paralel zincirler arasındaki hidrojen bağlarının sonucu olarak şekillenen daha az kararlı faz olduğunu belirtmişlerdir. PA6 polimerine ilave edilen KNT katkının  $\alpha$ -formunu daha şiddetli hale getirirken  $\gamma$ -formunun şiddetini azalttığını belirtmişlerdir. Sonuç olarak, kompozitlerde baskın fazın  $\alpha$ -fazı olduğu belirtilmiştir (Liu vd., 2004). Hassani ve arkadaşları (2014), katkısız PA6 polimerinin  $2\theta:21.4^\circ$  de baskın faz olan  $\gamma$ -formunu, ve yaklaşık  $2\theta:20^\circ$  ve  $2\theta:23.7^\circ$  de  $\alpha$ -formunu oluşturduklarını belirtmişlerdir., KNT katkının (002) düzleminde yapılarındaki grafitik düzlemleri doğrulayan  $2\theta:26^\circ$  de pik elde edilmiştir. Çalışmada kullanılan kompozitlerin, (200), (002) ve (220) (Sahoo vd., 2009; Zhang vd., 2009) veya (100), (010) ve (110) (Li vd., 2007) düzlemlerine karşılık gelen  $2\theta:20.5^\circ$  ve  $2\theta:23.9^\circ$  de  $\alpha$ -formunu oluşturduklarını belirtmişlerdir. Bu piklerin, PA6 nanokompozit yapı içerisinde KNT tarafından  $\alpha$  kristal formunun tetiklendiğini göstermektedir.



Şekil 3. ÇDKNT, PA6 polimeri ile PA6 nanokompozitlerin XRD grafiği.

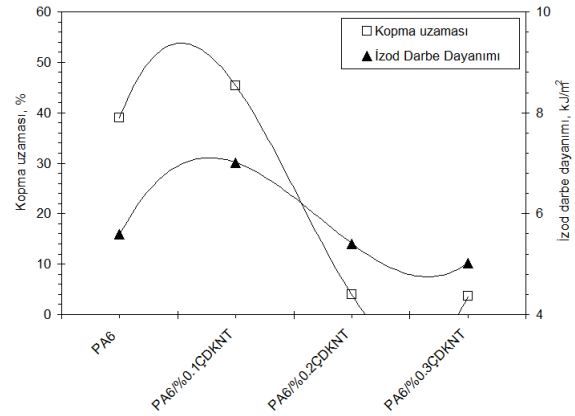
## Çekme ve darbe testi sonuçları



**Şekil 4.** ÇDKNT katkılı PA6 polimer kompozitlerin çekme dayanımı ve elastiklik modülü sonuçları.

KNT katkılı polimer kompozitlerin mekanik özellikleri KNT katkının miktarından, dağılımından, yönlenmesinden ve en/boy oranından önemli oranda etkilenmektedir (Hassani vd., 2014). Şekil 4'de ÇDKNT katkılı PA6 polimer nanokompozitlerin çekme dayanımı ve elastisite modülleri verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi PA6 polimerine ilave edilen % 0.1 oranındaki ÇDKNT çekme dayanımını azaltmıştır. 71.7 MPa olan katkısız PA6 polimerinin çekme dayanımı % 3.46 oranında azalarak 69.3 MPa olarak elde edilmiştir. PA6 polimerine ilave edilen % 0.2 ve % 0.3 oranındaki ÇDKNT ise çekme dayanımını sırasıyla % 2.86 ve % 5.79 oranlarında artırmıştır. Mekanik özelliklerdeki düşük artış oranı, polimer içerisindeki KNT katkının homojen olmayan dağılımı nedeniyle KNT katkının takviye etkisinin zayıf kalmasına bağlanabilir. KNT katkının yüksek yüzey enerjisi topaklanmaya sebep olmuş olabilir. Dolayısıyla bu topaklanmalar, polimer içerisinde homojen olmayan dağılım ve dolayısıyla gerilim yoğunlaşmasına yol açmaktadır (Zhu vd., 2006). Ayrıca, polimer matris ile KNT katkı arasında herhangi bir kimyasal veya hidrojen bağının oluşmaması mekanik özelliklerdeki artış oranını etkilediği düşünülmektedir. Elastiklik modülü sonuçları incelendiğinde, PA6 polimerine ilave edilen % 0.1 oranındaki ÇDKNT katkı elastiklik

modülünü azaltırken, artan ÇDKNT miktarına bağlı olarak elastiklik modülünün arttığı belirlenmiştir. Katkısız PA6 polimeri ile karşılaştırıldığında, % 0.3 ÇDKNT katkılı PA6 polimerinin elastiklik modülü % 7.8 oranında artarak 2701MPa değerine ulaşmıştır. Hassani ve arkadaşları da (2014) yaptıkları çalışmada benzer sonuçları elde etmişlerdir. Yapılan çalışmada % 0.1 ve % 0.2 KNT ilavesinde çekme modülünün ortalama % 6 ve % 8 oranlarında arttığını belirtmişlerdir. Çekme dayanımı ve elastisite modülündeki artışın yüksek dayanıma sahip KNTler ile PA6 matris arasında iyileşen yük transferi mekanizmasına bağlanmışlardır (Nasir vd., 2014).



**Şekil 5.** ÇDKNT katkılı PA6 polimer kompozitlerin kopma uzaması ve izod darbe dayanımı sonuçları

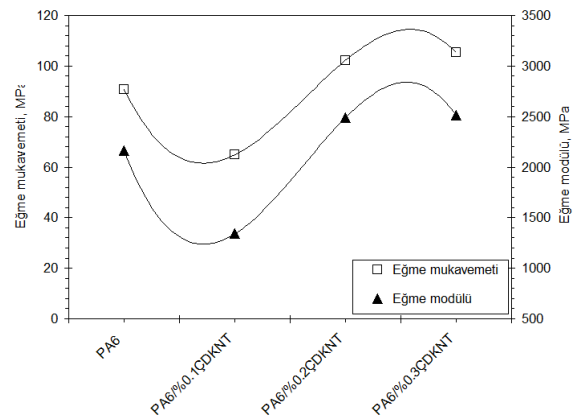
Şekil 5'te ÇDKNT katkılı PA6 polimer kompozitlerin kopma uzaması ve izod darbe dayanımı sonuçları verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi PA6 polimerine ilave edilen % 0.1 oranındaki ÇDKNT kopma uzamasını artırmıştır. % 39.99 olan katkısız PA6 polimerinin kopma uzaması % 7.18 oranında artarak % 45.39 olarak elde edilmiştir. PA6 polimerine ilave edilen % 0.2 ve % 0.3 oranındaki ÇDKNT ise kopma uzaması değerlerini sırasıyla % 888 ve % 988 oranlarında azaltmıştır. Bu sonuç PA6 kristalleşme sırasında PA6 zincirleri arasında yerleşen KNTlerin zincir hareketliliğini engelleyerek polimeri daha rijit ve dolayısıyla daha gevrek haline getirmesinden kaynaklanmaktadır (Hassani vd., 2014; Vahedi

vd., 2014). Ayrıca, kopma uzamasındaki azalmanın, PA6 matrisi içerisinde, KNT katkıların fiziksel olarak çapraz bağlı noktalar gibi davranarak topaklanması ile çatlak yayılımını başlatan gerilim konsantrasyonu gibi davranmasından kaynaklanabilir (Katti vd., 2014). Benzer bir sonuç Liu ve arkadaşları (2004) tarafından yapılan ÇDKNT katkılı PA6 polimerinde de edilmiştir. Kopma uzamasının, katkısız PA6 polimeri ile karşılaştırıldığında yapının gevrek hale gelmesinden dolayı %27 oranında azaldığını belirtmişlerdir. Katkısız PA6 polimerinin  $5.5 \text{ kJ/m}^2$  olan darbe dayanımı % 0.1 ÇDKNT ilave edilmesiyle % 25 oranında artarak  $7.01 \text{ kJ/m}^2$  olarak elde edilmiştir. % 0.2 ve % 0.3 ÇDKNT ilavesinde ise katkısız PA6 polimeri ile karşılaştırıldığında, darbe dayanımının %11.2 oranında azaldığı belirlenmiştir. Genel olarak, ÇDKNT katkılı nanokompozitler darbe hasarlarından önemli oranda etkilenmektedir. Kompozitte darbe etkisi sırasında, hasar bölgesi, matrisin çatlaması nedeniyle gerilim yığılmasını lokal olarak büyütme çalışmaktadır. Ancak, darbe etkisiyle oluşan bu hasar kompozit yapı içerisinde bulunan ÇDKNT katkı ile engellenebilmektedir. Bu yüzden, kompozitte bulunan ÇDKNT katkının artan miktarı ile darbe mukavemeti artırılabilir. Bu durum aynı zamanda kompozitlerin kırılma tokluğu ile yakından ilişkilidir. Diğer bir ifade ile ÇDKNT katkı ile polimer arasındaki arayüzey bağı ne kadar kuvvetli ise darbe dayanımı da o kadar yüksek olmaktadır. ÇDKNT katkının % 10-30 arasında olduğu tahmin edilen kırılma şekil değiştirmesi, eğilme ve burkulmaya izin vermektedir ve bu yüksek esneklik ÇDKNT katkılı polimer kompozitler için yüksek darbe dayanımı elde edilmesine katkı sağlamaktadır (Dimitrios, 2010). Yong ve arkadaşları (2011) % 5 ve % 10 ÇDKNT katkılı PS polimerinin darbe dayanımlarını inceledikleri çalışmada, %5 oranındaki ÇDKNT katkısının darbe dayanımını % 300 oranında artırdığını ancak artan ÇDKNT miktarı ile darbe dayanımının azaldığını belirtmişlerdir. Kaştan ve arkadaşları da (2016) artan nano katkı miktarına bağlı olarak darbe dayanımlarının azaldığını belirtmişlerdir. Bunun sebebinin ise polimer zincirlerinin olumsuz

etkilenmesine, matris içerisinde katkının homojen dağılmamasına, yapısal hatalara ve boşluk oluşumuna bağlamışlardır.

### Eğilme deneyi sonuçları

Şekil 6'da ÇDKNT katkılı PA6 polimer kompozitlerin eğilme dayanımı ve eğilme elastisite modülü sonuçları verilmiştir. Grafikler incelendiğinde elde edilen sonuçların çekme testi ile elde edilen sonuçlar ile benzer oldukları görülmektedir. Katkısız PA6 polimerinin 90.79 MPa olan eğilme dayanımı, % 0.1 ÇDKNT ilavesi ile % 39,9 oranında azalarak 64,88 MPa olarak elde edilmiştir. PA6 polimerine ilave edilen % 0.2 ve % 0.3 oranlarındaki ÇDKNT katkısı ise eğilme dayanımını artırmıştır. Bu artış, katkısız PA6 polimeri ile karşılaştırıldığında, % 0.2 ÇDKNT için % 12.65 oranında elde edilirken % 0.3 ÇDKNT için % 16 oranında elde edilmiştir. Benzer sonuçlar Ramana (2010) ve Katti (2014) tarafından yapılan çalışmalarda da elde edilmiştir. Ramana ve arkadaşları (2010) yaptıkları çalışmada %1KNT ilavesi ile eğilme dayanımının yaklaşık %60 oranında artarak 77MPa elde edildiğini belirtmişlerdir. Katti ve arkadaşları (2014) yaptıkları çalışmada da PP polimerinin 45MPa olan eğilme dayanımının %10 oranında ÇDKNT ilavesi ile %36 oranında artarak 61MPa elde edildiğini belirtmişlerdir. Eğilme modülü incelendiğinde ise 1.5GPa olan PP polimerinin değerinin %2.5, 5 ve 10 oranlarında ÇDKNT ilavesi ile %45-50 oranında arttığı belirtilmiştir.



Şekil 6. ÇDKNT katkılı PA6 polimer kompozitlerin eğilme dayanımı ve eğilme modülü sonuçları.

## Deney sonuçları

ÇDKNT katkılı PA6 polimer nanokompozitlerin mekanik özelliklerinin incelendiği çalışmada aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

PA6 polimerine ilave edilen % 0.1 oranındaki ÇDKNT çekme dayanımını azaltırken artan ÇDKNT miktarına bağlı olarak çekme dayanımı artmıştır.

% 39.99 olan katkısız PA6 polimerinin kopma uzaması % 7.18 oranında artarak % 45.39 olarak elde edilmiştir.

Katkısız PA6 polimerinin 5.5 kJ/m<sup>2</sup> olan darbe dayanımı, % 0.1 ÇDKNT ilave edilmesiyle % 25 oranında artarak 7.01 kJ/m<sup>2</sup> olarak elde edilmiştir.

PA6 polimerine ilave edilen % 0.2 ve % 0.3 oranlarındaki ÇDKNT katkının hem eğme mukavemetini hem de eğmedeki elastiklik modülünü artırdığı belirlenmiştir.

## Teşekkür

Yazarlar, desteklerinden dolayı Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Başkanlığına teşekkür eder (Proje No: 2016-90).

## Kaynaklar

- Bhagwan, F.J., Mayur, S., Madan, K. ve Prakash, K.B., (2012). Dispersion and Performance Properties of Carbon Nanotubes (CNTs) Based Polymer Composites: A Review, *Journal of Encapsulation and Adsorption Sciences*, **2**, 69-78.
- Dimitrios, B., (2010). Microstructure and Properties of Polypropylene/Carbon Nanotube Nanocomposites, *Materials*, **3**, 2884-2946.
- Grady, B.P., Pompeo, F., Shambaugh, R.L. ve Resasco, D.E., (2002). Nucleation of polypropylene crystallization by single-walled carbon nanotubes, *Journal of Physical Chemistry B*, **106**, 23, 5852-5858.
- Hassani, A.J., Mohd Ishak, Z.A. ve Mohamed, A.R., (2014). Preparation and characterization of polyamide 6 nanocomposites using MWCNTs based on bimetallic Co-Mo/MgO catalyst, *Express Polymer Letters*, **8**, 3, 177-186.
- Humin, L., Xiangmin, X., Xiaohong, L. ve Zhijun, Z., (2006). Morphology, crystallization and dynamic mechanical properties of PA66/nano-

- SiO<sub>2</sub> composites, *Bulletion Materials Science*, **29**, 5, 485-490.
- Jiang, Z., Gyurova, L., Zhang, Z., Friedrich, K. ve Schlarb, A.K., (2008). Neural network based prediction on mechanical and wear properties of short fibers reinforced polyamide composites, *Materials Design*, **29**, 3, 628-637.
- Kanagaraj, S., Varanda, F.R., Zhil'tsova, T.V., Oliveira, M.S.A. ve Simoes, J.A.O., (2007). Mechanical properties of high density polyethylene/carbon nanotube composites, *Composites Science Technology*, **67**, 15-16, 3071-3077.
- Kartel, M., Sementsov, Y., Mahno, S., Trachevskiy, V. ve Bo, W., (2016). Polymer Composites Filled with Multiwall Carbon Nanotubes, *Universal Journal of Materials Science*, **4**, 2, 23-31.
- Kaştan, A., (2016). Polimerik Malzemelerin Darbe Dayanımına Nano Katkıların Etkisi, *Bartın Üniversitesi Mühendislik ve Teknoloji Bilimleri Dergisi*, **4**, 2, 78-84.
- Katti, S.R., Sridhara, B.K. Krishnamurthy, L. ve Shekar, G.L., (2014) Mechanical Behaviour of MWCNT Filled Polypropylene Thermoplastic Composites, *Indian Journal of Advances in Chemical Science*, **2**, 6-8.
- Kearns, J.C. ve Shambaugh, R.L., (2002). Polypropylene fibers reinforced with carbon nanotubes, *Journal of Applied Polymer Science*, **86**, 2079-2084.
- Khanna, Y.P. ve Khun, W.P., (1997). Measurement of crystalline index in nylons by DSC: Complexities and recommendations. *Journal of Polymer Science*. **35**, 2219-2231.
- Kumar, S.S. ve Kanagaraj, G., (2016). Investigation on Mechanical and Tribological Behaviors of PA6 and Graphite-Reinforced PA6 Polymer Composites, *Arabian Journal of Science Engineering*, **41**, 4347-4357.
- Li, J., Fang, Z., Zhu, Y., Tong, L., Gu, A. ve Liu, F., (2007). Isothermal crystallization kinetics and melting behavior of multiwalled carbon nanotubes/polyamide-6 composites. *Journal of Applied Polymer Science*, **105**, 3531-3542.
- Liu, T., Tong, Y. ve Zhang, W.D., (2007). Preparation and characterization of carbon nanotube/polyetherimide nanocomposite films, *Composites Science Technology*, **67**, 3-4, 406-412.
- Liu, T.X., Phang, I.Y., Shen, L., Chow, S.Y. ve Zhang W.D., (2004). Morphology and

- mechanical properties of multiwalled carbon nanotubes reinforced nylon-6 composites, *Macromolecules*, **37**, 7214-7222.
- Manchado, M.A.L., Valentini, L., Biagiotti, J. ve Kenny, J.M., (2005). Thermal and mechanical properties of single-walled carbon nanotubes-polypropylene composites prepared by melt processing, *Carbon*, **43**, 7, 1499-1505.
- Meincke, O., Kaempfer, D., Weickmann, H., Friedrich, C., Vathauer, M. ve Warth, H., (2004). Mechanical properties and electrical conductivity of carbon-nanotube filled polyamide-6 and its blends with acrylonitrile/butadiene/styrene, *Polymer*, **45**, 3, 739-748.
- Nasir, M., Mohammad, I., Asad, H., Shaukat, S. ve Ahmad Nawaz, K., (2014). Polyamide-6-based composites reinforced with pristine or functionalized multi-walled carbon nanotubes produced using melt extrusion technique, *Journal of Composite Materials*, **48**, 10, 1197-1207.
- Ogasawara, T., Ishida, Y., Ishikawa, T. ve Yokota, R. (2004). Characterization of multi-walled carbon nanotube/phenylethynyl terminated polyimide composites, *Composite Part A: Applied Science Manufacturing*, **35**, 1, 67-74.
- Park, S.H. ve Bandaru, P.R., (2010). Improved mechanical properties of carbon nanotube/polymer composites through the use of carboxyl-epoxide functional group linkages, *Polymer*, **51**, 5071-5077
- Patti, A., Barretta, R., Marotti de Sciarra, F., Mensitieri, G., Menna, C. ve Russo, P., (2015). Flexural properties of multi-wall carbon nanotube/polypropylene composites: Experimental investigation and nonlocal modeling, *Composite Structures*, **131**, 282-289.
- Ramana, G.V., Balaji, P., Kumar, P.N, Parabhabar, K.V.P. ve Jain, P.K., (2010). Mechanical properties of multi-walled carbon nanotubes reinforced polymer nanocomposites, *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences*, **17**, 331-337.
- Renê Anisio da, P., Amanda Melissa Damião, L., Edcleide Maria, A., Vanessa da Nóbrega, M., Tomás Jeferson Alves de, M. ve Luiz Antônio, P., (2016). Mechanical and thermomechanical properties of polyamide 6/Brazilian organoclay nanocomposites, *Polímeros*, **26**, 1, 52-60,
- Sahoo, N.G., Cheng, H.K.F., Cai, J., Li, L., Chan, S.H., Zhao, J. ve Yu, S., (2009). Improvement of mechanical and thermal properties of carbon nanotube composites through nanotube functionalization and processing methods. *Materials Chemistry and Physics*, **117**, 313-320 .
- Vahedi, F., Shahverdi, H.R., Shokrieh, M.M. ve Esmkhani, M., (2014). Effects of carbon nanotube content on the mechanical and electrical properties of epoxy-based composites, *New Carbon Materials*, **29**, 6, 419-425.
- Xiao, K.Q., Zhang, L.C. ve Zarudi, I., (2007). Mechanical and rheological properties of carbon nanotube-reinforced polyethylene composites, *Composites Science Technology*, **67**, 2, 177-182.
- Yasser, Z., (2015). Effects of interphase on tensile strength of polymer/CNT nanocomposites by Kelly-Tyson theory, *Mechanics of Materials*, **85**, 1-6.
- Yong, L., Kai, M. N., Chi-Ming, C., Guoxing, S. ve Jingshen, W., (2011). High-impact polystyrene/halloysite nanocomposites prepared by emulsion polymerization using sodium dodecyl sulfate as surfactant, *Journal of Colloid and Interface Science*, **358**, 2, 423-429.
- Yousif, B.F. ve El-Tayeb, N.S.M., (2008). Wear and friction characteristics of CGRP composite under wet contact condition using two different test techniques, *Wear*, **265**, 5-6, 856-864.
- Zanjanijam, A.R., Hajian, M., Koohmareh, G.A.J., (2014). *Macromol. Sci. Part A*, **51**, 369.
- Zhang, F., Zhou, L., Xiong, Y., Liu, G. ve Xu, W., (2009). Isothermal crystallization kinetics of high-flow nylon 6 by differential scanning calorimetry. *Journal of Applied Polymer Science*, **111**, 2930-2937.
- Zhu, B.K., Xie, S.H., Xu, Z.K., Xu, Y.Y., (2006). Preparation and properties of the polyimide/multi-walled carbon nanotubes (MWNTs) nanocomposites, *Composites Science and Technology*, **66**, 548-554.
- Zou, Y., Feng, Y., Wang, L. ve Liu, X., (2004). Processing and properties of MWNT/HDPE composites, *Carbon*, **42**, 2, 271-277.



## Investigation of the mechanical properties of multi walled carbon nanotube filled polyamide 6 polymers

### Extended abstract

*Polymers and composites with lower density and higher strength/weight ratio than steel and aluminum have become one of the most important material groups for the automotive sector.*

*A variety of 15 polymer types are used in a car, but most preferred are polypropylene (PP), polyurethane (PU), polyvinylchloride (PVC), polyethylene (PE), acrylonitrile-butadiene-styrene (ABS) and nylon (PA). Approximately 75% of the polymer and composite applications in automobiles are used in the interior trims, 14% in the outer part and 11% in the electric parts and under hood components. When the passenger section of any car is examined, it can be seen that the polymers are used extensively. Polymers are used in heating, ventilation and air conditioning control systems, control panels, lighting, bumper systems, fuel storage and supply systems, mirror and door components, fenders, engine compartment or other parts under the hood.*

*It is a known fact that the weight will decrease with increasing the ratio of polymer and composite used in the car. Fillers such as talc, mica, and calcium carbonate provide a high modulus of elasticity while increasing the weight and melt viscosity of the polymer. At the same time, these fillers reduce toughness and surface quality. Glass fibers provide high stiffness while increasing ductility and cost. These conventional fillers are significantly increase the weight because of used at high levels,.*

*In recent years, the use of nano-reinforced polymer nano composites is increasing. This is due to do fact that although nano materials are used much less amount (wt. 0.1-5%) than traditional fillers (wt. 10-50%), they provide similar or even superior mechanical and chemical material properties. The important properties of polymer nano composites compared to other composites are that they can be easily shaped with different manufacturing processes on different sectors and have low density because of using lower amounts of filler material.*

*Graphene and carbon nanotubes are the most common nano-scale additives. The most important*

*characteristics are that they have a very large surface area compared to their weights, they have strong interface with matrix materials and they have very high physical and mechanical properties.*

*In this study, multi-walled carbon nanotube (MWCNT) was added to polyamide 6 (PA6) polymers to obtain PA6/MWCNT nano composites and the effects of varying amount of MWCNT on the tensile, bending and impact mechanical properties of composite were investigated. The twin screw extruder is used to ensure homogeneous distribution of the MWCNT nanoparticles in the PA6 matrix. The tensile, bending and impact test specimens were obtained by using plastic injection molding manufacturing method. According to the result of the study, it was detected that the amount of MWCNT had a significant effect on the mechanical properties of PA6 matrix. Depending on the amount of increasing MWCNT, the tensile and flexural strengths and the modulus of elasticity of PA6/MWCNT nano composites increased by 5.79%, 16% and 7.8% respectively, while the impact strength and deformation values decreased by 11.2% and 988%, respectively.*

**Keywords:** Polyamide 6, Multi walled carbon nanotube, Mechanical properties