



GRAFEN NANOPLAKALARIN CAM ELYAF TAKVİYELİ PA6 KOMPOZİTLERİN YAPISAL VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

Nurefşan KUVVET^{1*}, Elif ULUTAŞ¹, Münir TAŞDEMİR¹

¹ Marmara Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

Anahtar Kelimeler	Öz
<i>Poliamid 6, Cam Elyaf, Grafen Nanoplaka, Polimer Kompozit, Polimer Nanokompozit.</i>	Bu çalışmada, poliamid 6 (PA6) ve cam elyaf (CE) esaslı hazır kompozitlere, farklı oranlarda (ağırlıkça %1, %2 ve %3) grafen nanoplakalar (GnP) eklenerek elde edilen nanokompozitlerin mekanik, termal ve mikroyapısal özellikleri incelenmiştir. Kompozitler, eriyik ekstrüzyon yöntemiyle hazırlanmış ve ardından enjeksiyon kalıplama ile test numuneleri üretilmiştir. Üretilen numuneler; çekme, darbe, sertlik, yoğunluk, nem oranı ve eriyik akış indeksi (MFI) gibi testlerle karakterize edilmiş, mikroyapı ise taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, GnP ilavesinin elastisite modülünü artırarak rijitliği geliştirdiğini, ancak artan GnP oranının darbe dayanımı ve kopma uzamasını sınırladığını göstermektedir. %3 GnP içeriğinde elastisite modülü %14 artarken, kopma uzaması %14 ve darbe dayanımı %19 azalmıştır. Ayrıca %1 GnP katkısıyla MFI değerinde %145'lik artış elde edilmiş ve işlenebilirlikte belirgin bir iyileşme sağlanmıştır. Bu sonuçlar, GnP'nin cam elyaf takviyeli PA6 kompozitlerde mekanik davranış, mikroyapı ve işlenebilirlik arasındaki ilişkiyi inceleyen kapsamlı bir değerlendirme sunmakta; çok düşük GnP oranlarının dahi performansı önemli ölçüde etkileyebileceğini göstermektedir. Çalışmanın özgün katkısı, GnP'nin cam elyaf takviyeli PA6 matrisindeki çok düşük katkı oranlarında dahi oluşturduğu yapı-özellik ilişkisini nicel olarak ortaya koyması ve özellikle işlenebilirlik ile mekanik performans arasındaki çelişkili etkiyi detaylı şekilde açıklamasıdır.

THE EFFECT OF GRAPHENE NANOPATELETS ON THE STRUCTURAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF GLASS FIBER REINFORCED PA6 COMPOSITES

Keywords	Abstract
<i>Polyamide 6, Glass Fiber, Graphene Nanoplatelets, Polymer Composite, Polymer Nanocomposite.</i>	In this study, the mechanical, thermal, and microstructural properties of nanocomposites produced by adding graphene nanoplatelets (GnP) at different contents (1 wt%, 2 wt%, and 3 wt%) to commercially available polyamide 6 (PA6) and glass fiber (GF)-based composites were investigated. The composites were prepared via melt extrusion and subsequently injection molded to obtain test specimens. The produced samples were characterized through tensile, impact, hardness, density, moisture content, and melt flow index (MFI) tests, while their microstructure was examined using scanning electron microscopy (SEM). The findings show that the addition of GnP enhances stiffness by increasing the elastic modulus, whereas higher GnP contents limit impact strength and elongation at break. At 3 wt% GnP, the elastic modulus increased by 14%, while elongation at break and impact strength decreased by 14% and 19%, respectively. Furthermore, the addition of 1 wt% GnP resulted in a 145% increase in MFI, indicating a significant improvement in processability. Overall, the results present a comprehensive evaluation of the relationship between mechanical behavior, microstructure, and processability in glass fiber-reinforced PA6 composites containing GnP, demonstrating that even very low GnP contents can considerably influence composite performance. The originality of this study lies in quantitatively revealing the structure-property relationship induced by very low GnP contents in the glass fiber-reinforced PA6 matrix and in providing a detailed explanation of the conflicting effects between processability and mechanical performance.

Alıntı / Cite

Kuvvet, N., Ulutaş, E., Taşdemir, M., (2026). Grafen Nanoplakaların Cam Elyaf Takviyeli PA6 Kompozitlerin Yapısal ve Mekanik Özelliklerine Etkisi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 14(1), 57-68.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

N. Kuvvet, 0009-0002-9753-8247
E. Ulutaş, 0000-0001-7753-8878
M. Taşdemir, 0000-0001-8635-7251

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date	31.07.2025
Revizyon Tarihi / Revision Date	22.11.2025
Kabul Tarihi / Accepted Date	05.01.2026
Yayın Tarihi / Published Date	20.03.2026

* İlgili yazar / Corresponding author: nurefsan.kuvvet@marmara.edu.tr, +90-530-037-6524

THE EFFECT OF GRAPHENE NANOPATELETS ON THE STRUCTURAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF GLASS FIBER REINFORCED PA6 COMPOSITES

Nurefşan KUVVET[†], Elif ULUTAŞ¹, Münir TAŞDEMİR¹

¹ Marmara University, Faculty of Technology, Department of Metallurgical and Materials Engineering, İstanbul, Türkiye

Highlights

- Graphene-containing nanocomposites were produced by extrusion method.
 - The effect of graphene nanoplates on the mechanical properties of nanocomposites was investigated.
 - Microstructural properties of nanocomposites were examined.
-

Purpose and Scope

This study aims to evaluate the effects of graphene nanoplatelets (GnP) addition at different loadings (1 wt%, 2 wt%, 3 wt%) on the mechanical, thermal, and microstructural properties of commercial PA6/glass fiber composites. The focus is to improve stiffness and processability of PA6 composites while understanding the trade-offs in ductility and impact resistance.

Design/methodology/approach

The nanocomposites were produced by melt extrusion and injection molding. Characterization included tensile, impact, hardness, density, moisture content, and melt flow index tests, along with SEM microstructural analysis.

Findings

Results showed that low GnP content improved elastic modulus and MFI significantly. However, increasing GnP loading decreased elongation at break and impact strength. SEM images revealed agglomeration and interfacial weakening at higher GnP concentrations, correlating with reduced toughness.

Research limitations/implications

Only limited GnP ratios were studied; further work is needed to optimize filler content and improve interfacial bonding. The balance between stiffness improvement and ductility loss must be carefully managed in future designs.

Practical implications

GnP additions of 1–2 wt% offer enhanced stiffness and processability, making PA6/GF composites suitable for applications demanding dimensional stability and manufacturability.

Originality

This study provides insight into the multifunctional role of GnP in PA6/glass fiber composites and identifies an optimal filler range to enhance mechanical performance without severely compromising ductility.

[†] Corresponding author: nurefsan.kuvvet@marmara.edu.tr, +90-530-037-6524

1. Giriş (Introduction)

Modern mühendislik malzemelerinden olan polimerler günümüzde sıklıkla kullanılmaktadır. Ancak bazı durumlarda saf polimerlerin mekanik özellikleri tek başına yeterli olmayabilir (Dias vd., 2023). Bu sebeple polimerlere çeşitli takviyeler ve dolgular katılarak performansı artırılır ve kompozit malzemeler oluşturulur (Hsissou vd., 2019; Van De Werken vd., 2020). Polimer kompozit malzemeler, hafiflik, yüksek mekanik dayanım ve kimyasal direnç gibi özellikleri sayesinde otomotiv, havacılık, yapı ve elektronik gibi birçok endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır (Botelho, 2003; Sathishkumar vd., 2014). Metallere kıyasla daha düşük yoğunluğa sahiptir ve karışık şekilli parçalar üretmek polimer kompozitlerle daha kolaydır (Tarhini & Tehrani-Bagha, 2019; Vaggar & Kamate, 2020).

Dünya çapında araştırmacılar kompozit malzemelerin özelliklerini daha iyi hale getirmek ve performansını artırmak için nano katkı maddelerinin kullanımı gibi yöntemler keşfetmiştir (Madhad & Vasava, 2022). Nano katkı maddeleriyle geliştirilen nanokompozitler, hafif olmalarına rağmen yüksek mukavemetli yapısal malzemelerin elde edilmesine olanak tanır (O'Neill vd., 2014). Son derece yüksek özgül yüzey alanı, kompozitte büyük miktarda ara faz oluşturulmasını ve katkı maddeleri ile matris arasında güçlü bir etkileşimi kolaylaştırır. Nano ölçekli yapıların benzersiz özellikleri ve bu parçacıkların homojen dispersiyonu, düşük katkı seviyelerinde dahi yüksek takviye verimliliği sağlar (Akkapeddi, 2000; Lin vd., 2012). Bu gibi sebeplerden ötürü son yıllarda nanokompozitler geleneksel kompozitlerin yerini almaya başlamıştır (Kausar, 2018).

Yüksek mukavemet, kimyasallara dayanım, yüksek aşınma ve yıpranma direnci, yüksek bariyer özellikleri ile öne çıkan PA kristalin yapıya sahip bir mühendislik polimeridir (Gong & Yang, 2009; Khademinejad & Mehdipour-Ataei, 2017; Madhad & Vasava, 2022). Bunların aksine, düşük termal stabilite, zayıf boyutsal stabilite, düşük elektriksel iletkenlik ve yüksek nem emme kapasitesi gibi bazı dezavantajları da bulunmaktadır (Madhad & Vasava, 2022; Q. Li vd., 2012; Zeng vd., 2006). Malzemenin nem absorpsiyonu, polimer matrisin yapısal bütünlüğünü zayıflatarak mekanik özelliklerde belirgin bir düşüşe yol açmaktadır. Literatürdeki çalışmalar, PA6'nın higroskopik doğasının, özellikle uzun süreli nem maruziyeti altında, mekanik dayanım ve sertlik gibi özellikleri olumsuz yönde etkilediğini göstermektedir (Chaichanawong vd., 2016; Ferreño vd., 2011). Bu olumsuz etkinin giderilmesi amacıyla PA/CE polimer kompozitleri geliştirilmiştir (Hsissou vd., 2021b; H. Li vd., 2020; X. Song vd., 2020). CE, yüksek sıcaklık ve korozyona karşı direnç göstermesinin yanı sıra, neredeyse yok denecek kadar düşük nem emilimi ile öne çıkmaktadır (Akkapeddi, 2000.; Von Turkovich & Erwin, 1983). Aynı zamanda CE takviyesi sayesinde, standart PA6'ya kıyasla elastik modülde belirgin iyileşmeler elde edilmiştir (Güllü vd., 2006; Pan vd., 2014). Çakır ve arkadaşları, epoksi matrisine ağırlıkça %30, %40, %50 ve %60 oranlarında cam elyaf ilavesiyle hazırladıkları kompozitlerde elastik modülün kademeli olarak arttığını rapor etmişlerdir (Çakır & Berberoğlu, 2018). Aranha ve arkadaşları, yapmış oldukları çalışmada cam elyaf takviye edilmiş kompozitlerin, takviye içermeyen kompozitlere kıyasla daha düşük nem emilimi gösterdiğini bildirmişlerdir (Aranha vd., 2023).

Polimer nanokompozit üretiminde takviye malzemesi olarak kullanılan grafen, en yüksek potansiyelli nano dolgulardan biridir (Madhad & Vasava, 2022; Mohan vd., 2018). İki boyutlu yapısı ve yüksek yüzey alanı sayesinde, düşük dolgu oranlarında dahi mekanik, termal ve elektriksel özelliklerde kayda değer iyileştirmeler sağlayabilmektedir (X. Fu vd., 2015; Ramanathan vd., 2008; Quan vd., 2009). Bu yönüyle grafen, yüksek performanslı polimer kompozitlerin geliştirilmesinde tercih edilen karbon esaslı nano takviyeler arasında yer almaktadır (Hu vd., 2014; Kausar vd., 2017). Cristina Vallés ve arkadaşları GnP katkısının polimerin elastik modül, mukavemet ve kopma anındaki gerinimini arttırdığını bildirmişlerdir (Vallés vd., 2020). Ding ve arkadaşları grafen oksit katkılı poliamid kompozitlerin termal iletkenliğinin, katkısız örneklerle göre daha yüksek olduğu ortaya koymuştur (Ding vd., 2014).

Bu çalışmada, üstün mekanik ve termal özellikleri nedeniyle matris malzeme olarak PA6/CE kompoziti seçilmiştir. Kompozitlerin performansını artırmak amacıyla %1, %2 ve %3 oranlarında grafen nanoplakalar takviye malzemesi olarak eklenmiştir. Hazırlanan kompozitler, GnP mekanik karıştırma ile homojen dağılımı sağlandıktan sonra eriyik ekstrüzyon yöntemiyle işlenmiş, granül hale getirilip kurutulmuş ve enjeksiyon kalıplama ile test numuneleri üretilmiştir. Numunelerin mekanik, termal ve mikroyapısal özellikleri; çekme, darbe, sertlik, yoğunluk, nem oranı, MFI ve parçacık boyut analizleriyle karakterize edilmiş, mikroyapıları ise SEM ile incelenmiştir. Bu çalışma, literatürde sınırlı olarak ele alınan PA6/CE hibrit matrislerde çok düşük GnP katkı oranlarının oluşturduğu yapı-özellik ilişkisini, mekanik, termal, mikroyapısal ve işlenebilirlik özelliklerine eş zamanlı etkisini, bütüncül bir şekilde inceleyerek özgün bir katkı sunmaktadır.

2. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

2.1. Malzemeler (Materials)

Yapılan çalışmada üretilen polimer kompozite ait bileşenlerin karışım oranları Tablo 1’de sunulmuştur. Çalışmada BASF (Ludwigshafen am Rhein, Almanya) tarafından temin edilen Ultramid® B3EG6 kodlu %30 CE katkı PA6 kompoziti kullanılmıştır. Enjeksiyon kalıplama işlemine uygun olan kompozitin erime sıcaklığı 220 °C, yoğunluğu 1,36 g/cm³ (ISO 1183) ve MFI 50 cm³/10 dk (275 °C /5 kg ISO 1133) olarak belirtilmiştir. Kompozitte bulunan cam elyafların genişliği ortalama 12 µm ve uzunluğu ise yaklaşık 400 µm’dir (Żurawik vd., 2021). Çalışmada kullanılan GnP Nanografi Nano Teknoloji A.Ş. (Ankara, Türkiye) firmasından temin edilmiştir. %99,9 saflığa sahip olan grafenin kalınlığı 5 nm, yüzey alanı 135 m²/g, ortalama çapı 7 µm ve yoğunluğu 2,27 g/cm³tür.

Tablo 1. PA6/CE/GnP polimer kompozitlerin karışım oranları (% ağırlıkça)
(Mixing ratios of PA6/CE/GnP polymer composites (% by weight))

Gruplar	PA6	Cam Elyaf	Grafen
PA6/CE	70	30	-
1PA6/CE/GnP	99 (70/30)		1
2PA6/CE/GnP	98 (70/30)		2
3PA6/CE/GnP	97 (70/30)		3

2.2. Numunelerin Hazırlanması (Preparation of Samples)

Hidrofilik yapısı nedeniyle yüksek nem emme kapasitesine sahip olan PA6’nın içindeki bağıl nemi uzaklaştırmak amacıyla, PA6/CE granülleri 80 °C’de 6 saat etüvde kurutulmuştur. Tablo 1’de belirtilen oranlarda tartımları yapılan bileşenler 15 dk boyunca mekanik olarak karıştırılmıştır. Ardından karışımlar çift vidalı bir ekstrüderde (L/D: 30, Mikrosan Makine ve Kalıp Sanayi A.Ş., Türkiye) eriyik halde karıştırılarak homojen hale getirilmiştir ve test numuneleri enjeksiyon makinesi (Yonca Makine, Türkiye) ile kalıplanmıştır. Üretim aşamalarında kullanılan cihazlara ait ön denemeler sonucu belirlenen optimum parametreler Tablo 2’de sunulmuştur.

Tablo 2. Ekstrüzyon makinesi ve enjeksiyon makinesi kullanım koşulları (Conditions of use of extrusion machine and dryer)

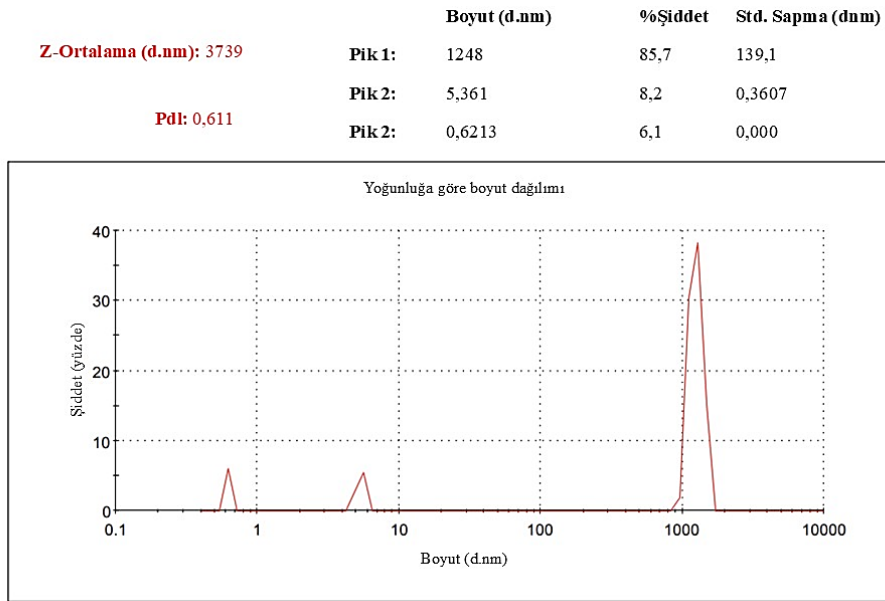
Ekstrüzyon Makinesi	Sıcaklık, °C	240-260
	Vida hızı, dev/dk	50-70
	Basınç, bar	80-100
Enjeksiyon Makinesi	Sıcaklık, °C	270-295
	Dozaj hacmi, cm ³	120
	Kapama kuvvet, kN	1200

2.3. Karakterizasyon (Characterization)

Çalışmada kullanılan grafenin ortalama parçacık boyutu ve polidispersite indeksi (PDI) dağılımı, Zetasizer (Malvern Instruments-Nano ZS) tarafından 633 nm maksimum 10 mW’da ışık kaynağı olarak He-Ne kullanılarak ve 25 °C’de belirlenmiştir. Bu çalışmada, Z ortalaması parçacıkların ortalama boyutu olarak değerlendirilmiştir. Şekil 1’de yer alan analiz sonuçlarına göre, yoğunluğa bağlı boyut dağılımı; Pik 1’de %85,7 oranla 1248 nm, Pik 2’de %8,2 oranla 5,361 nm ve Pik 3’te %6,1 oranla 0,6213 nm tepe değerlerine sahip olduğu gözlemlenmiştir. Bu veriler doğrultusunda Z ortalaması 3739 nm olarak belirlenmiştir. Parçacık boyutu dağılımının genişliğini ifade eden PDI değeri, 0 (monodispers) ile 1 (çok geniş dağılım) arasında değişmektedir. GnP’ler için elde edilen 0,611 PDI değeri, parçacık boyutunda orta seviyede bir değişim olduğunu göstermiştir.

Yapılan çalışmada polimer kompozitlerin özelliklerini belirlemek amacıyla çekme, yoğunluk, nem tayini, MFI, sertlik, darbe testleri uygulanmıştır. Yoğunluk tayini hassas terazi (Precisa 205 A SCS) ve Arşimet yoğunluk ölçüm ekipmanı kullanılarak, ISO 1183-1 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Nem tayini Kern DBS 60-3 marka/model cihaz kullanılarak ASTM D 6980 standardına uygun olarak belirlenmiştir. Polimerlerin akışkanlık özelliklerini belirlemek amacıyla gerçekleştirilen MFI testi, ISO 1133 standardına göre Zwick 4100 cihazı (2,16 kg yük/280 °C sıcaklık) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kompozitlerin çekme dayanımı, akma dayanımı, kopma uzaması ve elastikiyet modüllerini belirlemek için yapılan çekme testi ASTM D638 standardına uygun olarak 25 °C’de 50 mm/dk çekme hızında Zwick Z010 makinesi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sertlik testleri Zwick marka sertlik testi cihazında Tip D sertlik ölçer kullanılarak ASTM D2240 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir.

Kompozitlerin kırılma davranışı ISO 180/1 A standardına göre Zwick B5113 darbe test cihazı ile Izod çekici kullanılarak (çentikli) incelenmiştir. Mikroyapısal özellikleri belirlemek için darbe testi sonucunda elde edilen numunelerin kırık yüzeyleri Polaron SC7640 yüksek çözünürlüklü püskürtmeli kaplayıcı ile 20 Å kalınlığında altın-paladyum karışımı ile kaplanmıştır. Daha sonra kaplanan numunelerin kırık yüzeyi 20 kV ivme voltajında JEOL-JSM 5910 LV (JEOL Ltd., Tokyo, Japonya) SEM ile gözlenmiştir.



Şekil 1. Zetasizer, GnP parçacıklarının ortalama boyut dağılımı (Zetasizer, average size distribution of GnP particles)

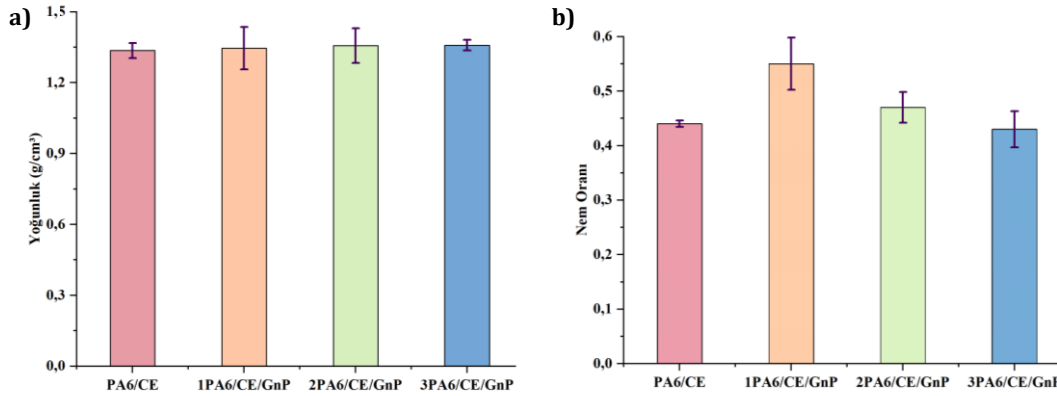
3. Deneysel Sonuçlar (Experimental Results)

Yapılan çalışmalar sonucunda elde edilen numunelerin yoğunluk değerleri Şekil 2a'da gösterilmiştir. PA6/CE kompozitinin yoğunluk değeri 1,3359 g/cm³ ve %1, %2 ve %3 GnP katkılı kompozitlerin yoğunlukları sırasıyla 1,3461, 1,3565 ve 1,3586 g/cm³ olarak ölçülmüştür. PA6/CE kompozitine kıyasla grafen daha yüksek bir yoğunluğa sahip olduğundan, GnP miktarıyla birlikte yoğunluk değerleri düzenli bir artış göstermiştir. Başka bir deyişle, GnP'nin polimere entegre edilmesi, malzemenin toplam kütlelerini artırmakta ve bu durum yoğunlukta bir artışa neden olmaktadır (Ulutas & Tasdemir, 2024). Altay ve arkadaşlarına ait grafit takviyeli ultra yüksek molekülağırlıklı polietilen nanokompozitlerin özelliklerinin incelendiği çalışmada katkı oranını artmasıyla yoğunlukta artış tespit edilmiştir. Benzer şekilde bu durum grafitin yoğunluğunun PE'nin yoğunluğundan daha yüksek olması ile ilişkilendirilmiştir (Altay vd., 2019).

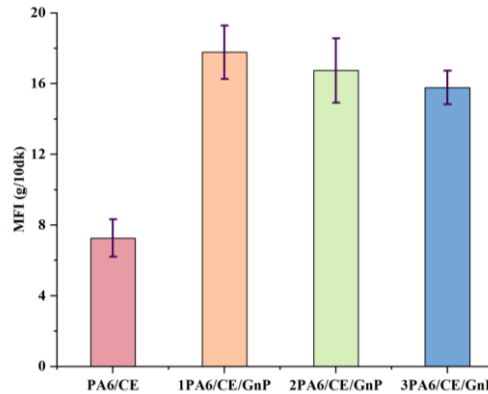
Şekil 2b'de sunulan nem tayini sonuçları, GnP ilavesinin kompozit yapıların nem alma davranışı üzerindeki etkisini ortaya koymaktadır. Referans PA6/CE kompoziti %0,44'lük bir nem oranı sergilemiştir. GnP katkısının %1'e çıkarılmasıyla bu değer %0,55'e yükselmiş ve numuneler arasında en yüksek nem oranı bu grupta kaydedilmiştir. Ancak, GnP içeriğinin %2 ve %3'e artırılmasıyla birlikte nem oranında kademeli bir azalma gözlenmiştir; bu gruplarda sırasıyla %0,47 ve %0,43'lük nem oranları ölçülmüştür. Bu durum, belirli bir katkı oranının üzerinde GnP'nin nem alımını sınırlayıcı bir etki gösterebildiğini düşündürmektedir. Kong ve arkadaşları GnP'nin nem emme davranışı üzerinde yaptıkları çalışmada katkı miktarına bağlı olarak iki farklı davranış gözlemlemişlerdir. Daha düşük GnP içeriğine sahip (0,5-1,0 % ağırlık) malzemelerde su emiliminde artış görülmüş, fakat daha yüksek GnP içeriğine sahip (1,5-2,0 % ağırlık) malzemelerde genellikle su emiliminde azalma gözlemlenmiştir (Kong vd., 2021). Bu duruma, düşük oranlı GnP katkısının matris içinde homojen dağılmamasının sebep olduğu düşünülmektedir (Prolongo vd., 2018). GnP miktarı arttıkça nem emiliminin azalması yapının daha az molekül geçişine izin verecek şekilde sıkışması olarak açıklanabilir. GnP takviyesiyle malzeme içinde yayılan moleküllerin difüzyonu zorlaşmakta daha uzun ve kıvrımlı yollar izlemek zorunda kalmaktadır. Bu etkiye "tortuous path" denmektedir (Cui vd., 2016).

Şekil 3'te sunulan MFI verileri, GnP PA6/CE kompozit matrisine ilavesiyle birlikte eriyik işleme davranışında belirgin değişimler meydana geldiğini ortaya koymaktadır. Referans PA6/CE kompoziti 7,2615 g/10 dk'lık bir MFI değerine sahipken, %1 oranında GnP içeren numunede bu değer yaklaşık 2,5 kat artarak 17,775 g/10 dk'ya ulaşmıştır. Bu artış, GnP'nin matris içerisinde zincir hareketliliğini artırarak akışkanlığı kolaylaştırdığı ve "yağlayıcı etki" (lubricant effect) gösterdiği şeklinde değerlendirilmektedir. Nitekim, Gomez ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada da benzer şekilde, düşük oranlarda GnP ilavesinin PA6 matrisinde MFI değerini

artırdığı ve bunun yağlayıcı etkiyle ilişkili olduğu belirtilmiştir (Gomez vd., 2020). Ancak GnP içeriği %2 ve %3'e çıkarıldığında, MFI değerleri sırasıyla 16,7405 ve 15,7815 g/10 dk olarak ölçülmüş ve %1 katkılı numuneye kıyasla hafif bir düşüş gözlenmiştir. Bu durum, yüksek miktarda grafen nanoplakaların polimer zincirlerinin hareketini fiziksel olarak kısıtlayarak eriyik viskozitesini artırdığı ve bu nedenle akışkanlığın bir miktar azaldığı şeklinde açıklanabilir. Yüksek MFI değerine sahip malzemeler daha düşük viskozite gösterdiğinden, üretim esnasında kalıbın daha verimli şekilde doldurulmasını sağlar (Ulutaş vd., 2024). Bu bağlamda, GnP katkısının uygun oranlarda kullanımı hem işlenebilirliği artırma hem de üretim verimliliğini iyileştirme açısından potansiyel sağlamaktadır.



Şekil 2. a) PA6/CE kompoziti ve PA6/CE/GnP nanokompozitlerin yoğunluk değerleri, b) PA6/CE kompoziti ve PA6/CE/GnP nanokompozitlerin nem oranı değerleri (a) Density values of PA6/CE composite and PA6/CE/GnP nanocomposites, b) Moisture content values of PA6/CE composite and PA6/CE/GnP nanocomposites)



Şekil 3. PA/CE kompoziti ve PA/CE/GnP nanokompozitlerin MFI değerleri (MFI values of PA6/CE composite and PA6/CE/GnP nanocomposites)

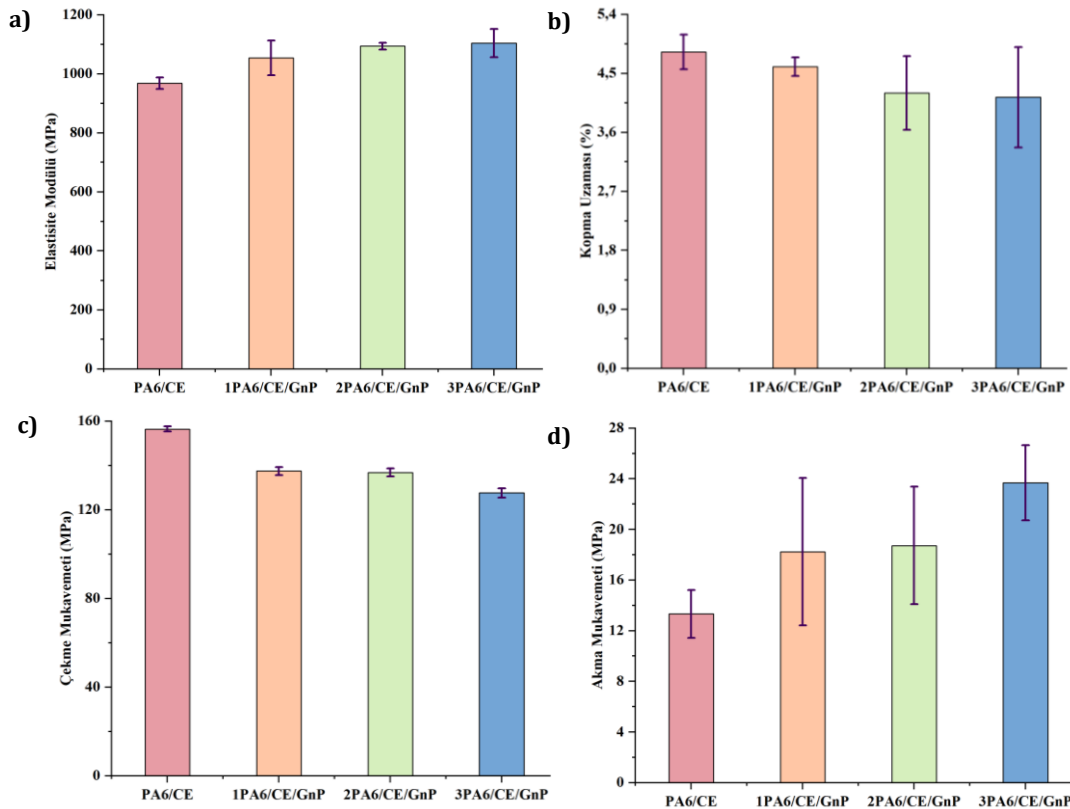
Yapılan çalışmada elde edilen numunelerin çekme testi sonuçları Şekil 4'te sunulmuştur. Elastisite modülü verilerine göre (Şekil 4a), GnP katkısının artan oranlarda ilavesiyle birlikte numunelerin rijitliğinde belirgin bir artış meydana gelmiştir. Referans PA6/CE kompoziti 968,2 MPa'lık bir elastisite modülüne sahipken, %1, %2 ve %3 oranlarında grafen katkısı ile bu değerler sırasıyla 1054 MPa, 1094 MPa ve 1104 MPa olarak ölçülmüştür. Bu durum, grafen nanoplakaların yüksek rijitlikteki yapısıyla polimer matrisin sertliğini artırmasına ve dış yükler altında deformasyon direncini yükseltmesine atfedilmiştir. Literatürde Zhang ve arkadaşları da grafen oksitle güçlendirilmiş PA kompozitlerde benzer şekilde elastisite modülünde artışlar bildirmiştir (Zhang vd., 2012).

Bununla birlikte, kopma uzaması değerleri elastisite modülündeki artış eğiliminin tersine bir davranış sergilemiş ve katkı oranı yükseldikçe düşüş göstermiştir (Şekil 4b). PA6/CE kompoziti %4,825'lik bir kopma uzamasına sahipken, bu değer %1, %2 ve %3 GnP katkısında sırasıyla %4,6, %4,2 ve %4,133'e gerilemiştir. Bu azalma, GnP'lerin polimer zincirlerinin hareketliliğini sınırlandırarak plastik deformasyon kabiliyetini azaltmasından kaynaklanmaktadır. Rashmi ve arkadaşlarının çalışması da benzer şekilde, elastisite modülündeki artışın kopma uzamasında kayda değer bir azalma ile birlikte gerçekleştiğini göstermektedir (Rashmi vd., 2018).

Çekme mukavemeti sonuçları ise (Şekil 4c), GnP ilavesinin bu özelliği üzerinde olumsuz bir etki yarattığını ortaya koymaktadır. Katkısız PA6/CE kompoziti 156,4 MPa ile en yüksek çekme mukavemetini sergilerken, %1, %2 ve %3 GnP katkılı numunelerde bu değerler sırasıyla 137,4 MPa, 136,8 MPa ve 127,6 MPa olarak belirlenmiştir. Bu

azalma, takviye fazın polimer matris içinde düzgün dağılmaması, zayıf arayüz bağları veya artan partikül içeriğine bağlı olarak oluşan içsel boşluklarla ilişkilendirilmektedir. Shen ve arkadaşları da artan grafen içeriğiyle çekme dayanımının düştüğünü ve bu durumun, kompozit içerisinde oluşan gözenekler ve zayıf ara yüzey etkileşimleri ile bağlantılı olduğunu ifade etmiştir (Shen vd., 2013). Aynı zamanda literatürde polimerin rijitliğini artırırken zincir hareketlerini kısıtlama etkisine sahip olan takviye malzemeleri çekme mukavemetinde azalmaya sebep olduğu bildirilmiştir (S. J. Lee vd., 2022).

Öte yandan, akma mukavemeti verileri (Şekil 4d) GnP katkısının bu özellik üzerinde olumlu bir etkisi olduğunu göstermektedir. PA6/CE kompozitte 13,318 MPa olarak ölçülen akma mukavemeti, %1, %2 ve %3 GnP ilavesiyle sırasıyla 18,7225 MPa, 18,24 MPa ve 23,678 MPa seviyelerine yükselmiştir. Akma mukavemetindeki bu artış, düşük oranlarda eklenen GnP'nin polimer matris ile arasında etkin bir yük transferi sağlamasına dayandırılmıştır (P. Song vd., 2011). Chatterjee ve arkadaşları da yaptıkları çalışmada, grafen katkısının akma mukavemetini artırıcı yönde etkide bulunduğunu bildirmiştir (Chatterjee vd., 2013).

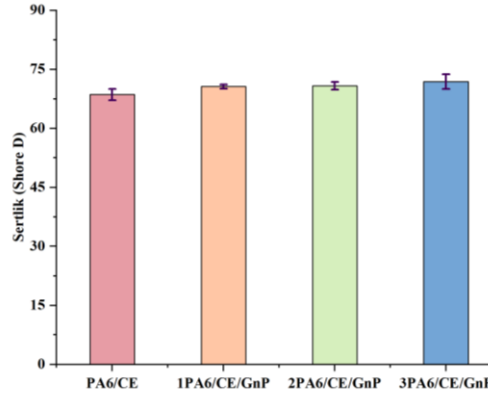


Şekil 4. PA6/CE kompoziti ve PA6/CE/GnP nanokompozitlerin çekme özellikleri a) Elastisite modülü (MPa), b) Kopma uzaması (%), c) Çekme mukavemeti (MPa), d) Akma mukavemeti (MPa) (Tensile properties of PA6/CE composite and PA6/CE/GnP nanocomposites a) Modulus of elasticity (MPa), b) Elongation at break (%), c) Tensile strength (MPa), d) Yield strength (MPa))

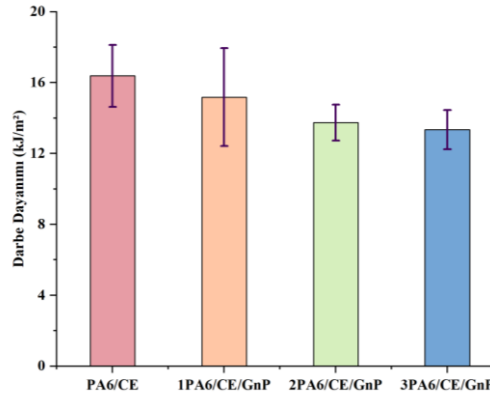
Şekil 5'te görüldüğü üzere, kompozitlere eklenen GnP miktarının artmasıyla birlikte sertlik değerlerinde kademeli bir artış gözlemlenmiştir. PA6/CE kompoziti 68,56 birimlik bir sertlik değeri sergilerken, %1, %2 ve %3 oranlarında GnP katkısı içeren kompozitlerde bu değerler sırasıyla 70,63, 70,83 ve 71,88 olarak ölçülmüştür. Sertlik değerlerindeki artış, SEM kırık yüzey analizleriyle doğrudan tutarlılık göstermektedir. Şekil 7 ve Şekil 8'de düşük GnP oranlarında daha homojen dağılımın matris deformasyonunu sınırladığı ve zincir hareketliliğini düşürdüğü SEM görüntülerinden anlaşılmakta olup, bu durum sertlikteki artışı açıklamaktadır. Lee ve arkadaşları yaptıkları çalışmada grafen ile polimer matrisi arasındaki kuvvetli çekim nedeniyle moleküler zincirlerin hareket kabiliyetinin azaldığını ve bunun da nanokompozitin sertliğini artırdığını raporlamıştır (P.-C. Lee vd., 2022). Benzer şekilde, Shen ve arkadaşları da GnP içeriğinin %0,5, %1 ve %1,5'e çıkarılmasıyla oluşan agregaların, mekanik mukavemeti sınırlayabilmesine rağmen, malzeme sertliğinde belirgin bir artışa neden olduğunu bildirmiştir (Shen vd., 2013).

Şekil 6'da verilen darbe dayanımı sonuçlarına göre, grafen takviyesi yapılan kompozit gruplarında darbe dayanımında kademeli bir azalma gözlenmiştir. PA6/CE kompoziti 16,38 kJ/m² ile en yüksek darbe dayanımına sahipken, %3 grafen içeren 3PA6/CE/GnP grubu bu değerin oldukça altına düşerek 13,34 kJ/m² seviyesine gerilemiştir. GnP ilavesi, kompozitlerin sertlik değerini artırmış, buna karşın kopma uzaması ve darbe dayanımı

gibi süneklığe bağlı mekanik özelliklerde azalmaya neden olmuştur. Bu durum, sertlik ile tokluk/süneklilik arasındaki klasik ters orantıya işaret etmektedir (S. J. Lee vd., 2022). Ji Zhao Liang yapmış olduğu çalışmada GnP katkısının %0,4'ten daha yüksek değerlerde kullanıldığında darbe dayanımında düşüşe sebep olduğunu kanıtlamıştır (Liang, 2019).

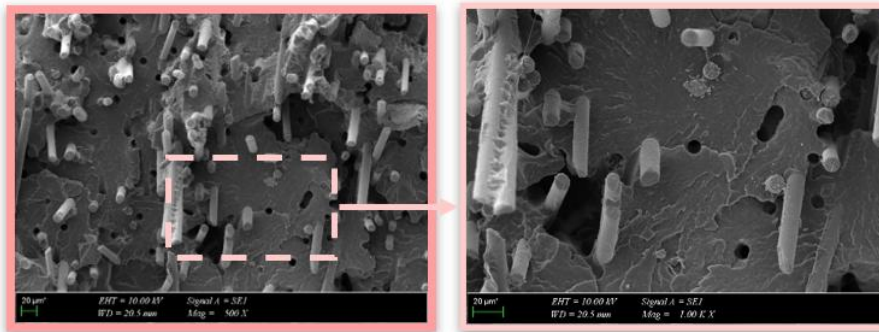


Şekil 5. PA/CE kompoziti ve PA/CE/GnP nanokompozitlerin sertlik değerleri (Hardness values of PA6/CE composite and PA6/CE/GnP nanocomposites)



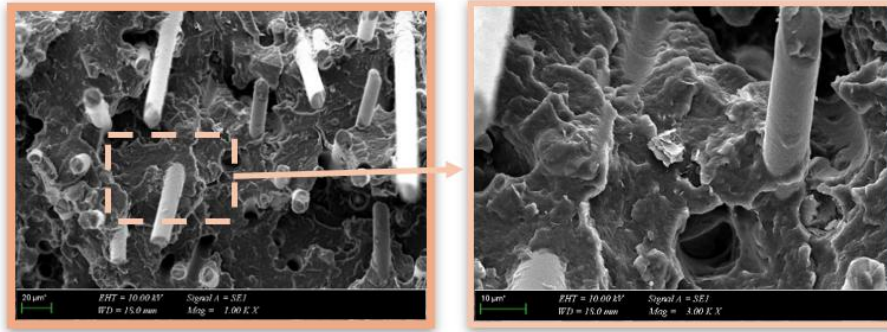
Şekil 6. PA/CE kompoziti ve PA/CE/GnP nanokompozitlerin darbe mukavemeti değerleri (Impact strength values of PA6/CE composite and PA6/CE/GnP nanocomposites)

PA/CE kompozit ve PA/CE/GnP nanokompozit malzemelerin kırılma davranışı, ara yüzey etkileşimleri ve mikroyapısal özelliklerini değerlendirmek amacıyla, darbe testleri sonrasında kırılan yüzeylere ait SEM görüntüleri farklı büyütmelerde incelenmiştir. Şekil 7'de verilen PA6/CE kompozit grubuna ait SEM görüntülerinde, cam elyafların matris içinde homojen dağıldığı ve genelde iyi bir arayüz bağı görülmüştür. Ancak bazı bölgelerde elyafların çekilmesiyle oluşan boşluklar ve matris içinde gözenekler tespit edilmiştir. Bu boşluklar, üretim sürecinde hapsolan hava veya mekanik testler sonrası elyaf-matris ayrılmasından kaynaklanabilir. Yüzeyde yer yer çatlak ve kırılma izleri de gözlemlenmiştir. Grafen içermeyen bu referans grupta yığılma ya da aglomerasyon bulunmamakta, bu da grubun daha sünek ve dengeli mekanik özellikler göstermesini açıklamaktadır.



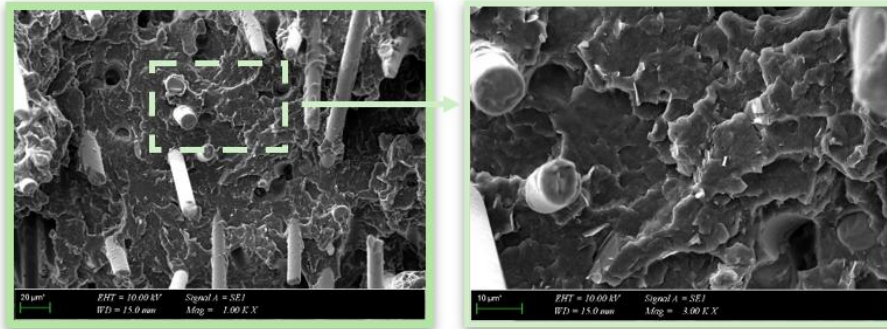
Şekil 7. PA6/CE kompozit grubu SEM görüntüleri (SEM images of PA6/CE composite group)

Şekil 8’de verilen 1PA6/CE/GnP kompozit grubuna ait SEM görüntüleri incelendiğinde, cam elyaf takviyeli matris yapısı içerisinde GnP’nin dağıldığı gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, bazı bölgelerde grafenlerin bir araya gelerek aglomerasyon oluşturduğu tespit edilmiştir. Elyaf ile matris arasındaki ara yüzeylerde kısmi boşluklar ve ayrılmaların mevcut olduğu belirlenmiş, bu durum ara yüzey etkileşimlerinin zayıf olduğuna işaret etmiştir. Kırılma yüzeyinde gözlenen pürüzlü yapı ve mikroyapısal boşluklar ise süneklik seviyesinin azalmış olabileceğini düşündürmektedir. Bu bulgular, söz konusu kompozit grubunda mekanik özelliklerde yalnızca sınırlı düzeyde iyileşme sağlandığını desteklemektedir. Grafen katmanları arasındaki güçlü van der Waals etkileşimleri sonucunda meydana gelen aglomeralar, polimer matrisinde homojen dağılımı engellemekte; bu da iletken ağ oluşumunu sınırlayarak kompozit malzemenin mekanik özelliklerinin etkin bir şekilde geliştirilmesini zorlaştırmaktadır (Vasiljević vd., 2020; Wang vd., 2020).



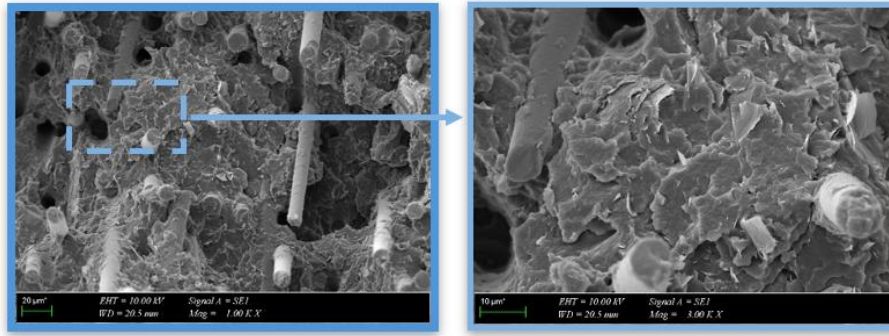
Şekil 8. 1PA6/CE/GnP kompozit grubu SEM görüntüleri (SEM images of 1PA6/CE/GnP composite group)

Şekil 9’da sunulan 2PA6/CE/GnP kompozit grubuna ait SEM görüntülerinde, cam elyaf takviyeli matris yapısı içerisinde GnP’lerin daha belirgin aglomerasyonlar oluşturduğu gözlemlenmiştir. Elyafın matris ile olan bağlantılarında, önceki gruba kıyasla daha belirgin ayrılmalar tespit edilmiştir. Ayrıca, matris fazında mikroyapısal boşlukların ve pürüzlü kırılma yüzeylerinin artmış olması, ara yüzey etkileşimlerinin zayıfladığına ve kompozitin sünekliğinde bir azalma meydana geldiğine işaret etmektedir. Bu morfolojik gözlemler, mekanik özelliklerde kaydedilen düşüşlerle tutarlılık göstermektedir. Doğası gereği kümelenme eğilimi gösteren GnP, eriyik işleme sırasında PA6 matrisinin yüksek viskozitesi nedeniyle yeterli derecede dağılmadığı ve bu nedenle aglomerasyon oluşumunun arttığı değerlendirilmektedir (Kausar, 2019).



Şekil 9. 2PA6/CE/GnP kompozit grubu SEM görüntüleri (SEM images of 2PA6/CE/GnP composite group)

Şekil 10’da verilen 3PA6/CE/GnP kompozit grubuna ait SEM görüntülerinde, cam elyaf takviyeli kompozit yapının matrise gömülü fiber dağılımı daha homojen bir görünüm sergilese de bazı bölgelerde elyaf-matris ara yüzeyinde boşlukların olduğu tespit edilmiştir. Elyafın çevresinde gözlemlenen boşluklar ve ayrılmalar, ara yüzey etkileşiminin önceki gruplara kıyasla daha zayıf olduğunu düşündürmektedir. GnP’lerin matrise dağılmasında kısmi bir homojenlik gözlemlense de bazı bölgelerde belirgin aglomerasyon yapıları bu gruba ait görsellerde de fark edilmiştir. Bu aglomerasyonlar, matris fazında mikroyapısal düzensizliklere ve kırılma yüzeylerinde pürüzlülüğün artmasına neden olmuştur. Kırılma yüzeyindeki pürüzlülük ve mikro boşlukların artması, malzemenin sünekliğinde azalmaya ve kırılmalıkta artışa işaret etmektedir. Bu morfolojik bulgular, 3PA6/CE/GnP grubunun mekanik performansında gözlemlenen düşüşlerle tutarlı sonuçlar ortaya koymuştur. GnP aglomeraları, oluşturdukları sterik engeller yoluyla yani kümelenerek meydana getirdikleri topaklar aracılığıyla, matrisin bu aglomeraların etrafını yeterli şekilde doldurmasını engelleyerek arayüz bağının zayıflamasına ve matris içerisinde boşluklar ile deliklerin oluşmasına neden olmaktadır (Yang vd., 2011).



Şekil 10. 3PA6/CE/GnP kompozit grubu SEM görüntüleri (SEM images of 3PA6/CE/GnP composite group)

4. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

Bu çalışmada, PA6/CE polimer kompozitine GnP'lerin farklı oranlarda (%1, %2 ve %3) eklenmesiyle elde edilen polimer nanokompozitlerin mekanik ve mikroyapısal özellikleri detaylı şekilde incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, düşük oranlardaki grafen katkısının elastisite modülü ve erime akış indeksinde anlamlı artışlar sağladığını göstermiştir. Bu iyileşme, GnP'lerin matriste yük taşıyıcı rol üstlenmesi ile açıklanabilir. Bununla birlikte, kopma uzaması ve darbe dayanımı gibi süneklikle ilişkili mekanik özelliklerde, grafen oranı arttıkça belirgin azalmalar gözlemlenmiştir. Bu durum, grafenin polimer zincirlerinin hareket kabiliyetini sınırlandırarak yapının kırılabilirliğini artırmasıyla ilişkilendirilmektedir. GnP katkı oranının artmasıyla birlikte Shore D sertlik değeri artmış, bu durum grafen ile matris arasındaki güçlü etkileşimlerin moleküler zincir sertliğini artırması ve agrega parçacıklarının malzemenin sertliğine katkı sağlamasıyla açıklanmıştır. SEM görüntüleriyle desteklenen morfolojik analizler, özellikle yüksek grafen içeriğine sahip gruplarda aglomerasyonların arttığını ve elyaf-matris ara yüzeyinde bağ zayıflamalarının oluştuğunu ortaya koymuştur. Bu yapı bozuklukları, mekanik performansta gözlemlenen düşüşlerle paralel değerlendirilmiştir. Sonuç olarak, grafen katkısının PA6/CE kompozitleri üzerinde çok boyutlu etkileri bulunduğu görülmüştür. Özellikle %1-2 aralığında yapılan katkıların, rijitlik ve akışkanlık gibi parametreleri iyileştirme potansiyeli taşırken; daha yüksek oranların sünekliği azaltma ve yapısal bütünlüğü zayıflatma riski taşıdığı anlaşılmıştır. Bu bağlamda, uygun grafen oranlarının belirlenmesi; hedeflenen özelliklere yönelik optimize kompozit tasarımı açısından kritik öneme sahiptir.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the authors.

Kaynaklar (References)

- Akkapeddi, M. K., 2000. Glass Fiber Reinforced Polyamide-6 Nanocomposites. *Polymer Composites*, 21(4), 576-585. <https://doi.org/10.1002/pc.10213>
- Altay, L., Atagür, M., Erbektaş, M., Sarıkanat, M., 2019. Grafit Nanoplaka Takviyeli Ultra Yüksek Molekül Ağırlıklı Polietilen Tabanlı Nano-Kompozit Malzeme Geliştirilmesi ve Karakterizasyonu Development and Characterization of Graphite Nanoplate Reinforced Ultra High Molecular Weight Polyethylene Based Nano-Composite Materials.
- Aranha, R., Filho, M. A. A., De Lima Santos, C., Fonseca, V. M., Rivera, J. L. V., De Lima, A. G. B., De Amorim, W. F., Carvalho, L. H., 2023. Water Sorption in Hybrid Polyester/Glass/Jute Composites Processed via Compression Molding and Vacuum-Assisted Resin Transfer Molding. *Polymers*, 15(22), 4438. <https://doi.org/10.3390/polym15224438>
- Botelho, E., 2003. Mechanical Behavior of Carbon Fiber Reinforced Polyamide Composites. *Composites Science and Technology*, 63(13), 1843-1855. [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(03\)00119-2](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(03)00119-2)
- Chaichanawong, J., Thongchuea, C., Areerat, S., 2016. Effect of Moisture On The Mechanical Properties of Glass Fiber Reinforced Polyamide Composites. *Advanced Powder Technology*, 27(3), 898-902. <https://doi.org/10.1016/j.apt.2016.02.006>
- Chatterjee, S., Nüesch, F. A., Chu, B. T. T., 2013. Crystalline and tensile properties of carbon nanotube and graphene reinforced polyamide 12 fibers. *Chemical Physics Letters*, 557, 92-96. <https://doi.org/10.1016/j.cplett.2012.11.091>
- Cui, Y., Kundalwal, S. I., Kumar, S., 2016. Gas Barrier Performance of Graphene/Polymer Nanocomposites. *Carbon*, 98, 313-333. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2015.11.018>
- Çakır, M., Berberoğlu, B., 2018. E-Cam Elyaf Takviyeli Epoksi Matrisli Kompozit Malzemelerin Elyaf Oranındaki Artış İle Mekanik Özelliklerindeki Değişimlerin İncelenmesi. *El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi*, 5(3), 734-740. <https://doi.org/10.31202/ecjse.415482>
- Dias, E., Chalse, H., Mutha, S., Mundhe, Y., Ambhore, N., Kulkarni, A., Mache, A., 2023. Review On Synthetic/Natural Fibers Polymer Composite Filled With Nanoclay and Their Mechanical Performance. *Materials Today: Proceedings*, 77, 916-925. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.12.059>
- Ding, P., Su, S., Song, N., Tang, S., Liu, Y., Shi, L., 2014. Highly Thermal Conductive Composites With Polyamide-6 Covalently-Grafted Graphene By An In Situ Polymerization and Thermal Reduction Process. *Carbon*, 66, 576-584.

- <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2013.09.041>
- Ferreño, D., Carrascal, I., Ruiz, E., Casado, J. A., 2011. Characterisation By Means of A Finite Element Model of The Influence of Moisture Content On The Mechanical and Fracture Properties of The Polyamide 6 Reinforced With Short Glass Fibre. *Polymer Testing*, 30(4), 420-428. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2011.03.001>
- Fu, X., Yao, C., Yang, G., 2015. Recent Advances In Graphene/Polyamide 6 Composites: A Review. *RSC Advances*, 5(76), 61688-61702. <https://doi.org/10.1039/C5RA09312K>
- Gomez, J., Villaro, E., Karagiannidis, P. G., Elmarakbi, A., 2020. Effects of Chemical Structure and Morphology of Graphene-Related Materials (Grms) On Melt Processing and Properties of GRM/Polyamide-6 Nanocomposites. *Results in Materials*, 7, 100105. <https://doi.org/10.1016/j.rinma.2020.100105>
- Gong, Y., Yang, G., 2009. Manufacturing and Physical Properties of All-Polyamide Composites. *Journal of Materials Science*, 44(17), 4639-4644. <https://doi.org/10.1007/s10853-009-3708-0>
- Güllü, A., Özdemir, A., Özdemir, E., 2006. Experimental Investigation of The Effect Of Glass Fibres On The Mechanical Properties of Polypropylene (PP) and Polyamide 6 (PA6) Plastics. *Materials & Design*, 27(4), 316-323. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2004.10.013>
- Hsissou, R., Abbout, S., Berisha, A., Berradi, M., Assouag, M., Hajjaji, N., Elharfi, A., 2019. Experimental, DFT and Molecular Dynamics Simulation On The Inhibition Performance of The DGDCBA Epoxy Polymer Against The Corrosion of The E24 Carbon Steel In 1.0 M Hcl Solution. *Journal of Molecular Structure*, 1182, 340-351. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2018.12.030>
- Hsissou, R., Seghiri, R., Benzekri, Z., Hilali, M., Rafik, M., Elharfi, A., 2021b. Polymer Composite Materials: A Comprehensive Review. *Composite Structures*, 262, 113640. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.113640>
- Hu, K., Kulkarni, D. D., Choi, I., Tsukruk, V. V., 2014. Graphene-Polymer Nanocomposites For Structural and Functional Applications. *Progress in Polymer Science*, 39(11), 1934-1972. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2014.03.001>
- Kausar, A., 2018. Composite Coatings of Polyamide/Graphene: Microstructure, Mechanical, Thermal, and Barrier Properties. *Composite Interfaces*, 25(2), 109-125. <https://doi.org/10.1080/09276440.2017.1340020>
- Kausar, A., Anwar, Z., Muhammad, B., 2017. Overview of Nonflammability Characteristics of Graphene and Graphene Oxide-Based Polymeric Composite and Essential Flame Retardancy Techniques. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 56(5), 488-505. <https://doi.org/10.1080/03602559.2016.1233274>
- Khademinejad, S., Mehdipour-Ataei, S., 2017. Aromatic Polyamide/Sepiolite Nanocomposite Materials: Synthesis, Structure, and Properties. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 56(17), 1916-1922. <https://doi.org/10.1080/03602559.2017.1295315>
- Kong, N., Khalil, N. Z., Fricke, H., 2021. Moisture Absorption Behavior and Adhesion Properties of GNP/Epoxy Nanocomposite Adhesives. *Polymers*, 13(11), 1850. <https://doi.org/10.3390/polym13111850>
- Lee, P.-C., Kim, S. Y., Ko, Y. K., Ha, J. U., Jeoung, S. K., Shin, D., Kim, J. H., Kim, M.-G., 2022. Tribological Properties of Polyamide 46/Graphene Nanocomposites. *Polymers*, 14(6), 1139. <https://doi.org/10.3390/polym14061139>
- Lee, S. J., Yoon, S. J., Jeon, I.-Y., 2022. Graphene/Polymer Nanocomposites: Preparation, Mechanical Properties, and Application. *Polymers*, 14(21), 4733. <https://doi.org/10.3390/polym14214733>
- Li, H., Xu, Y., Zhang, T., Niu, K., Wang, Y., Zhao, Y., Zhang, B., 2020. Interfacial Adhesion and Shear Behaviors of Aramid Fiber/Polyamide 6 Composites Under Different Thermal Treatments. *Polymer Testing*, 81, 106209. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2019.106209>
- Li, Q., Li, B., Zhang, S., Lin, M., 2012. Investigation On Effects of Aluminum and Magnesium Hypophosphites On Flame Retardancy and Thermal Degradation of Polyamide 6. *Journal of Applied Polymer Science*, 125(3), 1782-1789. <https://doi.org/10.1002/app.35678>
- Liang, J., 2019. Impact Fracture Behavior and Morphology of Polypropylene/Graphene Nanoplatelets Composites. *Polymer Composites*, 40(S1). <https://doi.org/10.1002/pc.24826>
- Lin, G., Xie, G., Sui, G., Yang, R., 2012. Hybrid Effect of Nanoparticles With Carbon Fibers On The Mechanical and Wear Properties of Polymer Composites. *Composites Part B: Engineering*, 43(1), 44-49. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2011.04.029>
- Madhad, H. V., Vasava, D. V., 2022. Review On Recent Progress In Synthesis of Graphene-Polyamide Nanocomposites. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 35(4), 570-598. <https://doi.org/10.1177/0892705719880942>
- Mohan, V. B., Lau, K., Hui, D., Bhattacharyya, D., 2018. Graphene-Based Materials and Their Composites: A Review On Production, Applications and Product Limitations. *Composites Part B: Engineering*, 142, 200-220. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.01.013>
- O'Neill, A., Bakirtzis, D., Dixon, D., 2014. Polyamide 6/Graphene Composites: The Effect of In Situ Polymerisation On The Structure and Properties of Graphene Oxide and Reduced Graphene Oxide. *European Polymer Journal*, 59, 353-362. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2014.07.038>
- Pan, Y., Hong, N., Zhan, J., Wang, B., Song, L., Hu, Y., 2014. Effect of Graphene on the Fire and Mechanical Performances of Glass Fiber-Reinforced Polyamide 6 Composites Containing Aluminum Hypophosphite. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 53(14), 1467-1475. <https://doi.org/10.1080/03602559.2014.909483>
- Prolongo, S. G., Jiménez-Suárez, A., Moriche, R., Ureña, A., 2018. Influence of Thickness and Lateral Size of Graphene Nanoplatelets on Water Uptake in Epoxy/Graphene Nanocomposites. *Applied Sciences*, 8(9), 1550. <https://doi.org/10.3390/app8091550>
- Quan, H., Zhang, B., Zhao, Q., Yuen, R. K. K., Li, R. K. Y., 2009. Facile Preparation and Thermal Degradation Studies of Graphite Nanoplatelets (Gnps) Filled Thermoplastic Polyurethane (TPU) Nanocomposites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 40(9), 1506-1513. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2009.06.012>
- Ramanathan, T., Abdala, A. A., Stankovich, S., Dikin, D. A., Herrera-Alonso, M., Piner, R. D., Adamson, D. H., Schniepp, H. C., Chen, X., Ruoff, R. S., Nguyen, S. T., Aksay, I. A., Prud'Homme, R. K., Brinson, L. C., 2008. Functionalized Graphene Sheets For Polymer Nanocomposites. *Nature Nanotechnology*, 3(6), 327-331. <https://doi.org/10.1038/nnano.2008.96>
- Rashmi, B. J., Prashantha, K., Lacrampe, M. -F., Krawczak, P., 2018. Scalable Production of Multifunctional Bio-Based Polyamide

- 11/Graphene Nanocomposites by Melt Extrusion Processes Via Masterbatch Approach. *Advances in Polymer Technology*, 37(4), 1067-1075. <https://doi.org/10.1002/adv.21757>
- Sathishkumar, T., Satheeshkumar, S., Naveen, J., 2014. Glass Fiber-Reinforced Polymer Composites – A Review. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 33(13), 1258-1275. <https://doi.org/10.1177/0731684414530790>
- Shen, M.-Y., Chang, T.-Y., Hsieh, T.-H., Li, Y.-L., Chiang, C.-L., Yang, H., Yip, M.-C., 2013. Mechanical Properties and Tensile Fatigue of Graphene Nanoplatelets Reinforced Polymer Nanocomposites. *Journal of Nanomaterials*, 2013(1), 565401. <https://doi.org/10.1155/2013/565401>
- Song, P., Cao, Z., Cai, Y., Zhao, L., Fang, Z., Fu, S., 2011. Fabrication of Exfoliated Graphene-Based Polypropylene Nanocomposites With Enhanced Mechanical and Thermal Properties. *Polymer*, 52(18), 4001-4010. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2011.06.045>
- Song, X., Wang, Y., Jiao, C., Huang, M., Wang, G.-H., Jiang, H., 2020. Microstructure Regulation of Polyamide Nanocomposite Membrane By Functional Mesoporous Polymer For High-Efficiency Desalination. *Journal of Membrane Science*, 597, 117783. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2019.117783>
- Tarhini, A. A., Tehrani-Bagha, A. R., 2019. Graphene-Based Polymer Composite Films With Enhanced Mechanical Properties and Ultra-High In-Plane Thermal Conductivity. *Composites Science and Technology*, 184, 107797. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2019.107797>
- Ulutas, E., Tasdemir, M., 2024. Engineering The Microstructure: Unveiling The Synergistic Effects of Gnp and Blowing Agents On PA6 Composite Foams. *Materials Today Communications*, 41, 110995. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2024.110995>
- Ulutaş, E., Taşdemir, M., Korkmaz, Ö. F., Kuvvet, N., Duran, M. C., 2024. Polipropilen/Montmorillonit Kompozit Köpüğünün Fiziksel, Termal Ve Morfolojik Özelliklerinin İncelenmesi. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*. <https://doi.org/10.17714/gumusfenbil.1444336>
- Vaggar, G. B., Kamate, S. C., 2020. Thermal Property Characterization For Enhancement of Thermal Conductivity Of Hybrid Polymer Composites. *Materials Today: Proceedings*, 20, 208-212. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.11.055>
- Vallés, C., Papageorgiou, D. G., Lin, F., Li, Z., Spencer, B. F., Young, R. J., Kinloch, I. A., 2020. PMMA-Grafted Graphene Nanoplatelets To Reinforce The Mechanical and Thermal Properties of PMMA Composites. *Carbon*, 157, 750-760. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2019.10.075>
- Van De Werken, N., Tekinalp, H., Khanbolouki, P., Ozcan, S., Williams, A., Tehrani, M., 2020. Additively Manufactured Carbon Fiber-Reinforced Composites: State of The Art and Perspective. *Additive Manufacturing*, 31, 100962. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.100962>
- Vasiljević, J., Demšar, A., Leskovšek, M., Simončič, B., Čelan Korošin, N., Jerman, I., Šobak, M., Žitko, G., Van De Velde, N., Čolović, M., 2020. Characterization of Polyamide 6/Multilayer Graphene Nanoplatelet Composite Textile Filaments Obtained Via In Situ Polymerization and Melt Spinning. *Polymers*, 12(8), 1787. <https://doi.org/10.3390/polym12081787>
- Von Turkovich, R., Erwin, L., 1983. Fiber Fracture In Reinforced Thermoplastic Processing. *Polymer Engineering & Science*, 23(13), 743-749. <https://doi.org/10.1002/pen.760231309>
- Wang, W., Ma, X., Sun, D., Qi, X., Yang, J., Wang, Y., 2020. Achieving Electrical Insulation, High Thermal Conductivity and High Fracture Toughness In Polyamide 6/Carbon Nanofiber Composites Through The Interfacial Welding Effect of Elastomer. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 128, 105671. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2019.105671>
- Yang, S.-Y., Lin, W.-N., Huang, Y.-L., Tien, H.-W., Wang, J.-Y., Ma, C.-C. M., Li, S.-M., Wang, Y.-S., 2011. Synergetic Effects of Graphene Platelets and Carbon Nanotubes On The Mechanical and Thermal Properties of Epoxy Composites. *Carbon*, 49(3), 793-803. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2010.10.014>
- Zeng, H., Gao, C., Wang, Y., Watts, P. C. P., Kong, H., Cui, X., Yan, D., 2006. In Situ Polymerization Approach To Multiwalled Carbon Nanotubes-Reinforced Nylon 1010 Composites: Mechanical Properties and Crystallization Behavior. *Polymer*, 47(1), 113-122. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2005.11.009>
- Zhang, X., Fan, X., Li, H., Yan, C., 2012. Facile Preparation Route For Graphene Oxide Reinforced Polyamide 6 Composites Via In Situ Anionic Ring-Opening Polymerization. *Journal of Materials Chemistry*, 22(45), 24081. <https://doi.org/10.1039/c2jm34243j>
- Żurawik, R., Volke, J., Zarges, J.-C., Heim, H.-P., 2021. Comparison of Real and Simulated Fiber Orientations in Injection Molded Short Glass Fiber Reinforced Polyamide by X-ray Microtomography. *Polymers*, 14(1), 29. <https://doi.org/10.3390/polym14010029>