

Geri Dönüştürülmüş PP Bazlı Nano Grafen Takviyeli Hibrit Kompozitlerin Geliştirilmesi ve Mekanik Özelliklerinin Mikromekanik Yöntemler ile Belirlenmesi

Development of Recycled PP Based Nano Graphene Reinforced Hybrid Composites and Determination of Mechanical Properties by Micromechanical Methods

Alaeddin Burak İREZ¹ , Ramazan KAYA¹ 

¹*Istanbul Teknik Üniversitesi (İTÜ), Makina Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye*

Öz

Koronavirüs (COVID-19) salgını tüm dünyada koruyucu ekipmanların, maskelerin ve tulumların kullanımı arttırmıştır. Koruyucu maske ve tulumların polipropilenden (PP) imal edildiğini düşündüğümüzde maske bazlı PP atık miktarı önem alınması gereken seviyelere çıkmıştır. Çevre kirliliğini önlemek ve ekosistemi tehlikeye atmaktan kaçınmak için atık maskelerin düzenli bir şekilde toplanması ve geri dönüştürülmesi çok önemlidir. Bu çalışmada, tek kullanımlık maskelerin geri dönüştürülmesiyle elde edilen polipropilen (rPP) matrisli kompozit malzemeler imal edilmiştir. Bu kompozit malzemelerin otomotiv sektöründeki tampon ve benzeri parçalarda kullanılması durumunda, geliştirilen kompozit malzemelerin kopma uzamasını ve rijitliğini arttırmak için sırasıyla Olefin Blok Kopolimer (OBC) ve Grafen Nanoplaka (GnP) takviyeleri kullanılmıştır. Takviye malzemelerine ön işlem uygulanmasından sonra kompozit malzemeler imal edilmiştir. Çekme deneyi sonuçlarına göre GnP takviyesi kompozitlerin dayanımını ve elastisite modülünü artırırken, OBC ise kompozitlerin kopma uzaması değerlerini iyileştirmiştir. Ayrıca bu çalışmanın diğer önemli bir amacı, imal edilen kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinin mikromekanik yaklaşımlar kullanılarak belirlenmesidir. Bunun için Halpin-Tsai (HT), Mori-Tanaka (MT) ve Öz-uyumlu Model (Self Consistent Model-SC) gibi analitik yöntemler kullanılıp elde edilen sonuçlar birbirleri ile karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmalar neticesinde düşük grafen takviyelerinde mikromekanik modeller ile tutarlı sonuçlar elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Eko-kompozitler, Geri dönüşüm, Tek kullanımlık maskeler, Grafen, Mikromekanik model

Abstract

The use of protective masks has increased worldwide due to the coronavirus (COVID-19) pandemic. Since disposable masks and protective clothing are generally made of polypropylene (PP), PP waste has increased to significant levels due to increased use. Therefore, it is very important to collect and reuse them on a regular basis to prevent environmental pollution and avoid endangering the ecosystem. In this study, recycled polypropylene (rPP) from used disposable masks was selected as the matrix material of sustainable composites. To improve the elongation capacity and stiffness of the matrix, olefin block copolymer (OBC) and graphene nanoplatelets (GnP) were respectively used. After the pretreatment of the reinforcements, the composites were manufactured and characterized experimentally. Results showed that GnPs improved the tensile strength and Young's moduli of the composites whereas OBC increased the strain capacity of the composites. Moreover, in this study, the mechanical properties of the manufactured composites were estimated using micromechanical homogenization models including Halpin-Tsai (HT), Mori-Tanaka (MT), and Self-Consistent Models (SC). It is seen that micromechanical methods were consistent with the experimental results for low content of GnP reinforcements.

Keywords: Eco-composites, Recycling, Disposable masks, Nano-Graphene, Micromechanical models

I. GİRİŞ

2019 yılında ortaya çıkan ve halen etkisini sürdüren COVID-19 salgını dolayısıyla pandemi öncesine göre tek kullanımlık maske ve koruyucu tulumların kullanımı otuz kat artmıştır. Bu durumun en önemli nedeni, Dünya Sağlık Örgütü'nün (WHO) maske kullanımının hastalıktan korunmak için etkili bir araç olduğu yönündeki açıklamasıdır ve bunun paralelinde maskelere olan talep çok yüksek mertebelere çıkmıştır [1]. Dokunmamış (nonwoven) kumaştan üretilen bu maskelerin kontrolsüz bir şekilde etrafa dağılması hem çevreyi kirletmekte hem de hastalığın bulaş riskini arttırmaktadır. Bu riskten kaçınmak için koruyucu ekipmanlar kontrollü bir şekilde toplanmalı ve geri dönüştürülmelidir. Böylece hem çevre kirliliğinin önüne geçilebilmekte hem de hastalığın bulaş tehlikesi önlenmektedir. Dokunmamış kumaştan yapılan bu tek kullanımlık maskelerin ham maddesi olarak polikarbonat, polistiren, polyester veya polietilen gibi çeşitli polimerler kullanılmaktadır [2]. Öte

yandan, tek kullanımlık maskelerin çok büyük bir çoğunluğunun ham maddesinin polipropilen (PP) olduğu göz önüne alındığında, her yıl önemli miktarda PP atığı ortaya çıkmaktadır.

PP; üretim kolaylığı, avantajlı mekanik ve fiziksel özellikleri sayesinde %19'luk pazar payı ile endüstride en sık kullanılan ikinci polimerdir [3]. Bu sebeple PP, otomotiv endüstrisinde tipik olarak hem dış hem de iç parçaların imalatında yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle otomobil tamponlarının dış kısmındaki polimer parça genellikle PP kullanılarak üretilmektedir. Bu bağlamda, otomobil tamponlarının hayat döngüleri mekanik anlamda incelendiğinde, kazalar ve yol koşulları nedeniyle yüksek deformasyonlara ve tekrarlı yüklere maruz kaldıkları sıklıkla görülmektedir. Bu nedenle, otomobil tamponlarının deformasyon kabiliyetinin iyileştirilmesi gerekir.

Elastomerler genellikle büyük deformasyon kapasitesine sahip olduğundan polimer kompozitlerin şekil değiştirebilme potansiyelini iyileştirmede kullanılabilir [4]. Bu düşüncenin paralelinde, kullanılacak elastomerin, matrisle kimyasal uyumluluğu büyük bir öneme sahiptir. Han ve arkadaşlarının çalışmaları incelendiğinde, elastomer-olefin blok kopolimerlerin (OBC), PP matris ile kimyasal olarak uyumlu olduğu görülmüştür. Bu uyumluluk, imalat esnasında elastomerler ile matrisin birbiri ile oluşturabileceği bağları arttırarak, matris-takviye ara yüzey kalitesini iyileştirmeyle sonuçlanmaktadır. Böylece, yük altında takviyeler ara yüzeylerden kopmayacak ve deformasyon kapasitesi artacaktır [5].

Kopmadan şekil değiştirebilme kapasitesinin artırılması dışında, alınan darbeler neticesinde oluşabilecek hasarların azaltılabilmesi için, malzemenin tokluğunun da artırılması gerekmektedir. Bu da malzemenin kopma uzamasına ek olarak çekme dayanımının da arttırılarak, çekme eğrisi altındaki toplam alanın arttırılmasıyla gerçekleştirilebilmektedir.

Kompozitin çekme dayanımını arttırmak için, geleneksel takviyelerin yerine nano ölçekli takviyeler yaygın olarak kullanılmaktadır. Nano ölçekli takviyeler arasından grafen nano plakalar (GnP) geniş yüzey alanı olmasının yanı sıra üstün mekanik (1 TPa elastisite modülü), elektriksel (>100 S/m elektrik iletkenliği) ve termal özelliklere (5000 W/mK ısı iletkenlik) sahiptir [5]. Bu özelliklere ek olarak, GnP'ler mikrodalgaya maruz kaldıklarında polimer malzemelerin içinde bir sıcaklık gradyanı oluşturur. Bu sıcaklık, lokal olarak polimer malzemenin erime sıcaklığı üzerine çıkılabilmektedir. Bunun neticesinde polimer matris, eriyerek kompozitin boşluklarının doldurulması ve kapatılmasını sağlayarak polimer matrisli kompoziti onarabilmektedir [7]. Bu

mekanizma, literatürde kendi kendini iyileştirme olarak adlandırılmaktadır. GnP takviyeli malzemeler, endüstriyel ürünlerin ömrünün uzatılması, bakım ve onarım işlemlerin yapılması gibi gelecek vaat etmektedir.

Literatürde, çeşitli çalışmalar takviyelerin PP bazlı kompozitlerin mekanik özellikleri üzerindeki etkisini incelemiştir. Monti ve arkadaşları, %5 OBC takviyesinin çentiksiz Izod darbe mukavemetini %63 ve kopma uzamasını saf rPP'ye kıyasla %480 artırdığını belirtmiştir [8]. Başka bir çalışmada, Yi ve arkadaşları PP matrisi için maleik anhidrit ile aşılana takviyelerin etkisini incelemişlerdir. Yüzde 10'luk OBC takviyesinin çekme mukavemetini %14 ve elastisite modülünü %20 azalttığını keşfetmişlerdir [9]. PP'nin grafen ile takviyesi incelendiğinde ise, Liang ve arkadaşları PP'nin çekme mukavemetinin GnP oranı ağırlıkça %0,3'e ulaşana kadar yaklaşık %7,5 arttığını, daha sonra ise azaldığını göstermiştir. Benzer şekilde, Izod darbe dayanımı ağırlıkça %0,3 GnP içeriğine kadar yaklaşık %5 artmakta, daha sonra önemli ölçüde azalmaktadır [10]. Ji-Zhao Liang'a göre, grafene ait lateral uzunluk arttıkça, PP matrisli kompozitlerin kırılma tokluğu artmaktadır [11]. Özetle, GnP ve OBC'nin ayrı ayrı modifikasyonunun etkisi farklı araştırmacılar tarafından ayrıntılı olarak incelenmiştir. Ancak yazarların literatür incelemelerine göre, GnP ve OBC takviyelerinin eş zamanlı etkisinin kapsamlı bir şekilde incelendiği hibrit kompozitlere rastlanılmamıştır. Dolayısıyla, bu çalışmada PP bazlı tek kullanımlık maskelerden geri dönüştürülmüş polipropilen (rPP) kullanarak hem çevresel hem de ekonomik olarak katma değerli kompozit malzemeler geliştirilerek bu açığın kapatılması amaçlanmıştır. Geri dönüşüm sonucu elde edilen rPP matrisi, GnP ve OBC ile takviye edilerek bir kompozit malzeme grubu geliştirilmiş ve bu kompozitlerin binek araçların tamponlarında kullanılması hedeflenmiştir. Ayrıca bu çalışmada esas olarak odaklanan diğer kısım ise; birden çok malzemenin bileşimiyle ortaya çıkan kompozitlerin elastisite modülünün tahmin edilmesi için Halpin-Tsai Modeli (HT), Mori-Tanaka Modeli (MT) ve Öz-uyumlu Model (Self Consistent Model, SC) gibi matematiksel modellerin uygulanması, modeller aracılığıyla elde edilen numerik sonuçların deneysel sonuçlarla karşılaştırılmasıdır.

1.1. Bünye Denklemleri ve Homojenizasyon

Kompozit malzemelerin eşdeğer mekanik özelliklerinin numerik olarak elde edilmesi mühendislik çalışmalarında büyük bir önem arz etmektedir. Deneysel çalışmaların yanı sıra kompozitlerin mekanik özelliklerinin ve davranışlarının matematiksel olarak modellenmesiyle mühendislik tasarımında ve ürün geliştirmede önemli avantaj sağlanabilmektedir. Numerik çalışmalar çerçevesinde; mikromekanik yaklaşımlardan, moleküler dinamikten ve kuantum

mekaniğinden istifade edilerek nano ölçekli takviyeli kompozitlerin elastisite modülü tahmin edilebilmektedir. Bu yöntemlerden, mikromekanik olanlara odaklanıldığında, takviye elemanlarının geometrisine, yönelimine, mekanik özelliklerine dayalı olarak Halpin – Tsai (HT) modeli, Mori-Tanaka (MT) modeli, Öz-Uyumlu (Self-consistent SC) model gibi çeşitli modeller görülmektedir [12]. Bu modeller arasında da GnP takviyeli kompozitlerin mekanik özelliklerinin hesabı üzerine MT ve HT gibi modeller yardımıyla literatürde hesaplamalar yapıldığı görülmüştür [12].

1.2. Halpin-Tsai (HT) Modeli

HT, yalnız bir şekilde matrisin elastik özellikleri ile takviye elemanının şekline ve oryantasyonuna dayalı bir modeldir. Kompozitte birden fazla takviye olduğu için HT modeli aşamalı olarak uygulanmıştır. Denklem 1’de görüldüğü gibi ilk olarak rPP ile OBC arasındaki ilişki modellenmiştir. Daha sonrasında GnP ile rPP+OBC arasındaki mikromekanik model oluşturulmuştur. Burada rPP ile OBC klasik HT ile modellenirken, GnP takviyeli kompozitler için HT’nin modifiye edilmiş formu kullanılmıştır [13]. Bu çalışmadaki nano grafen takviyeli kompozitlerin elastisite modülünü hesaplamak için Eşitlik (1) ve (2)’de kullanılmıştır.

$$E_{rPP+OBC} = E_{rPP}V_{rPP} + E_{OBC}V_{OBC} \quad (1)$$

$$= \left[\frac{3}{8} \frac{1 + \xi_L \eta_L V_{GnP}}{1 - \eta_L V_{GnP}} + \frac{5}{8} \frac{1 + \xi_w \eta_w V_{GnP}}{1 - \eta_w V_{GnP}} \right] E_{rPP+OBC} \quad (2)$$

Burada EM , matrisin elastisite modülünü, V_{GnP} , GnP’nin hacimsel oranını η_w , η_l , ξ_L ve ξ_w takviyelerin şekil parametrelerini ifade etmektedir. Bu parametreleri hesaplamak için; $EGnP$, GnP’nin elastisite modülü, l_{GnP} , w_{GnP} , h_{GnP} ise GnP’nin uzunluk, genişlik ve yüksekliği olmak üzere,

$$V_{GnP} + V_{rPP+OBC} = 1 \quad (3)$$

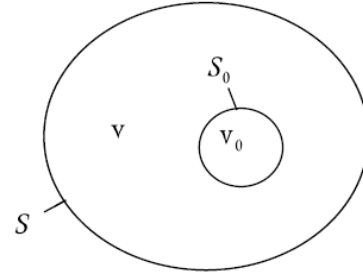
$$\eta_l = \frac{E_{GnP}/E_{rPP+OBC} - 1}{E_{GnP}/E_{rPP+OBC} + \xi_L}, \eta_w = \frac{E_{GnP}/E_{rPP+OBC} - 1}{E_{GnP}/E_{rPP+OBC} + \xi_w} \quad (4)$$

$$\xi_L = 2 \left(\frac{l_{GnP}}{h_{GnP}} \right), \xi_w = 2 \left(\frac{w_{GnP}}{h_{GnP}} \right) \quad (5)$$

Eşitlik (3-5) kullanılır [13]. Bu şekilde kompozitin elastisite modülü, E , hesaplanmıştır.

1.3. Eshelby Tensörü

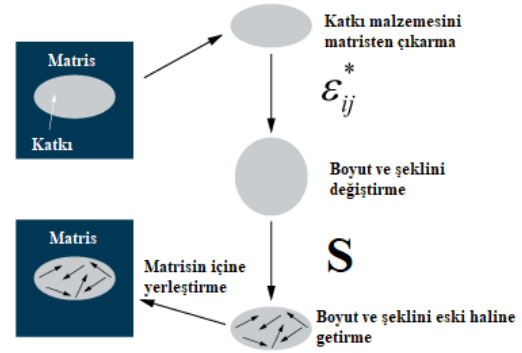
Eshelby tensörü, bir takviye içeren lineer elastik bir cisim üzerindeki gerilme (stress) ve birim şekil değişimini (strain) analitik olarak çözümlmek için 1957 yılında John D. Eshelby tarafından geliştirilmiştir [14]. Tensörlerin türetilirken hacmi V ve yüzey alanı S olan bir lineer homojen elastik yapıya sahip olduğu varsayılır. Şekil 1’de takviyenin yüzeyi S_0 ve hacmi V_0 , takviye dışında kalan matris hacmi ise V kabul edilerek tensör hesabı yapılır.



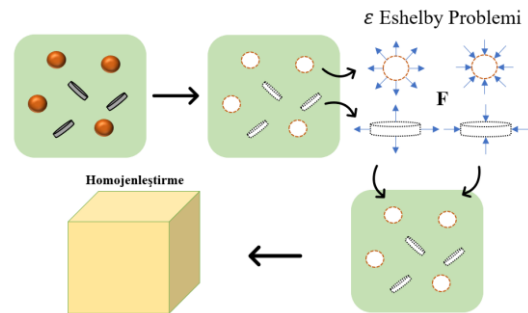
Şekil 1: S_0 yüzeye ve v_0 hacminde takviyeye sahip elastik bir malzeme [14]

Eshelby tensörünün tanımı Şekil 2’de gösterildiği gibi yapılır [15]. Sonsuz boyuttaki bir matristen elipsoid bir hacim kesilir, ardından şekli ve boyutunu değiştirecek ekgenlemeye (eigenstrain) uğrattılır. Elipsoid şeklinde çıkartılan parça eski haline getirilip matris içine yerleştirilir. Eshelby tensörü, bu işlemler sonucunda elde edilen S_{ijkl} tensörüdür [15].

Şekil 3’de ise GnP ve OBC takviyelerinin, rPP matrisinde kullanılmasıyla elde edilen kompozitin homojenizasyonu şematik olarak adım adım gösterilmiştir. Burada takviyelerin geometrileri ve hacim oranları dikkate alınarak, bir kompozitin genel malzeme özelliklerinin belirlenmesi amaçlanmıştır.



Şekil 2: Eshelby problemi [15]



Şekil 3: GnP ve OBC için Eshelby problemi ve Homojenleştirme

Takviye malzemesinde kısıtlanmış birim şekil değişimleri tanımlandığı için Eshelby tensörleri (S_{ijkl}) Eşitlik (6)’da gösterildiği gibi küçük simetri (Minor Symmetry) koşulunu sağlarken ana simetriyi (Major Symmetry) sağlamaz [14].

$$S_{ijkl} = S_{jikl} = S_{ijlk}, \quad S_{ijkl} \neq S_{klij} \quad (6)$$

Bu çalışmada, küresel ve disk şeklinde takviyeler kullanılmıştır ve bunların Eshelby tensör ifadeleri ise Eşitlik (7) ve (8)'de verilmiştir. Küresel takviyeler için;

$$\left(\frac{x'}{a}\right)^2 + \left(\frac{y'}{b}\right)^2 + \left(\frac{z'}{c}\right)^2 \leq 1 \quad (7)$$

$$S_{ijkl} = \frac{5\nu_0 - 1}{15(1 - \nu_0)} \delta_{ij}\delta_{kl} + \frac{4 - 5\nu_0}{15(1 - \nu_0)} (\delta_{ik}\delta_{jl} + \delta_{il}\delta_{jk}) \quad (8)$$

Eşitlik (7)'de a, b ve c ifadeleri x', y' ve z' doğrultularındaki boyutu göstermektedir. Küresel takviyeler için a = b = c alınarak Eşitlik (8)'deki gibi δ_{ij} Kronecker deltası ve ν_0 matrisin Poisson oranı yardımıyla kompakt Eshelby tensörü ifadesi yazılır. Daha anlaşılır olması için bu ifadeyi açarsak Eşitlik (9-11) elde edilir [14].

$$S_{1111} = S_{2222} = S_{3333} = \frac{7 - 5\nu_0}{15(1 - \nu_0)} \quad (9)$$

$$S_{1122} = S_{1133} = S_{2211} = S_{2233} = S_{3311} = S_{3322} = \frac{5\nu_0 - 1}{15(1 - \nu_0)} \quad (10)$$

$$S_{1212} = S_{2323} = S_{3131} = \frac{4 - 5\nu_0}{15(1 - \nu_0)} \quad (11)$$

Takviye malzemelerinin madeni para veya disk şeklinde olması durumunda ise a = b ≠ c alınarak Eşitlik (12-18)'deki gibi Eshelby tensörünün matris elemanları elde edilir [14].

$$S_{1111} = S_{2222} = \frac{\pi(13 - 8\nu_0)c}{32(1 - \nu_0)a} \quad (12)$$

$$S_{3333} = 1 - \frac{\pi(1 - 2\nu_0)c}{4(1 - \nu_0)a} \quad (13)$$

$$S_{1122} = S_{2211} = \frac{\pi(8\nu_0 - 1)c}{32(1 - \nu_0)a} \quad (14)$$

$$S_{1133} = S_{2233} = \frac{\pi(2\nu_0 - 1)c}{8(1 - \nu_0)a} \quad (15)$$

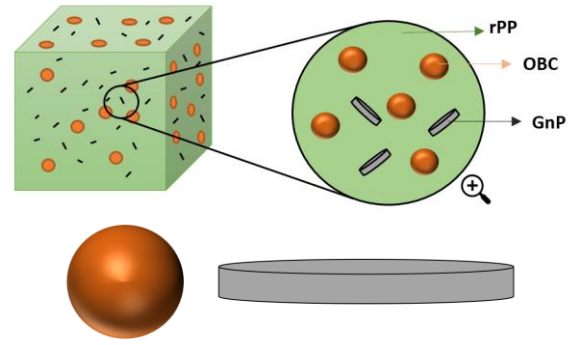
$$S_{3311} = S_{3322} = \frac{\nu_0}{(1 - \nu_0)} \left(1 - \frac{\pi(4\nu_0 + 1)c}{8\nu_0 a} \right) \quad (16)$$

$$S_{1212} = \frac{\pi(7 - 8\nu_0)c}{32(1 - \nu_0)a} \quad (17)$$

$$S_{3131} = S_{2323} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{\pi(\nu_0 - 2)c}{4(1 - \nu_0)a} \right) \quad (18)$$

Yukarıdaki ifadelerin yanı sıra diğer geometrilerdeki takviyeler için ifadeler literatürde bulunmaktadır.

Şekil 4'te disk ve küre şeklinde modellenen sırasıyla GnP ve OBC takviyelerinin matrisle birlikte oluşturduğu kompozite ait küp şeklinde bir hacim elemanı gösterilmiştir.

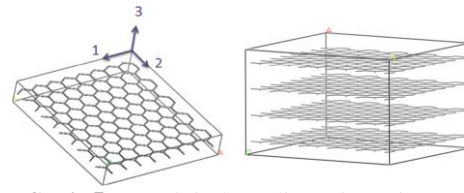


Şekil 4: Küresel ve disk şeklinde modellenen takviye malzemeleri

1.4. Mori-Tanaka (MT) Modeli

MT modeli, kompozitlerin makro boyuttaki özelliklerinin tahmin edilmesi için John D. Eshelby tarafından oluşturulan dönüşüm tensörlerini kullanılır. Bu model kullanılarak kompozitin mekanik özellikleri analitik ve kapalı bir şekilde hesaplanabilir. Bu yöntem her zaman her takviye malzemesi için uygun olmasa da analitik ve kapalı çözümler sunması, daha kesin sonuç ve daha kolay işlemler sağlaması nedeniyle partikül tipi takviyeli kompozitlerin mekanik özelliklerinin hesaplanmasında avantaj sağlar [16].

MT modeli, matris ve takviye malzemesinin öz niteliklerini kullanarak mikromekaniğe dayalı özellikleri belirlemek için dördüncü dereceden tensörleri kullanan bir tekniktir. Bu işlem için matrisin ve takviyelerin üç boyutlu elastik özellikleri gereklidir. Öte yandan GnP'ler, iki boyutlu ve enine izotropik (transversely isotropic) malzeme olarak sınıflandırılır [17].



Şekil 5: GnP için koordinat sistemi [17]

GnP'lerin $x_1 - x_2$ düzleminde olduğu varsayılırsa, Şekil 5'te gösterildiği gibi x_3 eksenine dik olarak kabul edilirler. GnP'nin elastik davranışı; elastisite modülü E_1 ve E_3 , kayma modülü G_{13} , Poisson oranları ν_{12} ve ν_{13} olmak üzere beş bağımsız parametre ile modellenmektedir. Moleküler Dinamik (Molecular Dynamics) yardımıyla hesaplanmış bu parametre değerleri, bu çalışmada kullanılan GnP'ye benzer özelliklerde olacak şekilde literatürden bulunmuştur [17]. Hill Parametreleri k, l, n, m ve p'nin yardımıyla, GnP'nin dördüncü dereceden katılık matrisleri büyük ölçüde basitleştirilmiştir [17].

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \cdot \varepsilon_{ij}, \quad \begin{pmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{44} \\ \sigma_{55} \\ \sigma_{66} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k+m & k-m & l & 0 & 0 & 0 \\ k-m & k+m & l & 0 & 0 & 0 \\ l & l & n & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & p & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & p & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & m \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ 2\varepsilon_{44} \\ 2\varepsilon_{55} \\ 2\varepsilon_{66} \end{pmatrix} \quad (19)$$

$$E_1 = \frac{4m(kn - l^2)}{(k+m)n - l^2}, \quad E_3 = n - \frac{l^2}{k}, \quad G_{13} = p \quad (20)$$

$$v_{12} = \frac{(k-m)n - l^2}{(k+m)n - l^2}, \quad v_{31} = \frac{l}{2k} \quad (21)$$

Burada σ_{ij} gerilme tensörü, ε_{ij} birim şekil değiştirme tensörü ve C_{ijkl} dördüncü derece elastik katılık matrisidir. Eşitlik (19-21)'de görüldüğü gibi GnP'nin elastik özellikleri kullanılarak katılık matrisleri hesaplanmıştır.

Ayrıca, $E_1=0,77 \times 10^6$ MPa, $E_3=0,4 \times 10^6$ MPa, $G_{13}=7 \times 10^3$ MPa, $v_{12}=0,03$ alınarak Hill Parametreleri hesaplanmıştır [17].

$$k = \frac{E}{2(1+\nu)(1-2\nu)}, \quad l = \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad (22)$$

$$m = p = \frac{E}{2(1+\nu)}, \quad n = \frac{(1-\nu)E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad (23)$$

Matris ve diğer takviye malzemeleri için katılık matrisi; Eşitlik (22) ve (23) kullanılarak Elastisite modülü E ve Poisson oranı ν yardımıyla hesaplanmıştır [17]. Bu çalışmada malzemenin birden fazla takviye malzemesi olduğu için MT formülü Eşitlik (24-26) verilmiştir [18].

$$C^{MT} = C^m + \sum_{\alpha=1}^M c_{\alpha} (C^{\alpha} - C^m) A^{\alpha} \quad (24)$$

$$A^{\alpha} = A_m^{\alpha} [c_m I + \sum_{\beta=1}^M c_{\beta} A_m^{\beta}]^{-1} \quad (25)$$

$$A_m^{\alpha} = [I + S^{\alpha} (C^m)^{-1} (C^{\alpha} - C^m)]^{-1} \quad (26)$$

Burada A_{α} deformasyon konsantrasyon tensörü, C_i katılık matrisleri, c_i ağırlıklı yüzde, I birim matris, S_{α} ise Eshelby tensörlerini ifade etmektedir. Katılık matrislerini ve Eshelby tensörünü hesaplamada kullanılan Eşitlik (6-26)'da açıkça ifade edilmiştir. MT modeli ile Eşitlik (24)'te görüldüğü gibi kompozit malzemenin elastik davranışına ait dördüncü dereceden katılık matrisi elde edilir. C_{MT} katılık matrisinin tersi alınırsa Eşitlik (27)'den görüleceği gibi kompozit malzemenin mühendislik katsayıları elde edilir [19].

$$C^{MT^{-1}} = \begin{pmatrix} 1 & -v_{21} & -v_{31} & 0 & 0 & 0 \\ E_{11} & E_{21} & E_{31} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{v_{12}}{E_{12}} & \frac{1}{E_{22}} & -\frac{v_{32}}{E_{32}} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{v_{13}}{E_{13}} & -\frac{v_{23}}{E_{23}} & \frac{1}{E_{33}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{31}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{pmatrix} \quad (27)$$

$$E_{11} = 1/C_{11}^{MT^{-1}}, \quad E_{22} = 1/C_{22}^{MT^{-1}}, \quad E_{33} = 1/C_{33}^{MT^{-1}} \quad (28)$$

$$G_{23} = 1/C_{44}^{MT^{-1}}, \quad G_{31} = 1/C_{55}^{MT^{-1}}, \quad G_{12} = 1/C_{66}^{MT^{-1}} \quad (29)$$

$$v_{12} = -C_{12}^{MT^{-1}}/C_{11}^{MT^{-1}}, v_{13} = -C_{13}^{MT^{-1}}/C_{11}^{MT^{-1}}, v_{23} = -C_{23}^{MT^{-1}}/C_{22}^{MT^{-1}} \quad (30)$$

Eşitlik (28-30)'da kompozit malzemenin elastisite modülü, kayma modülü ve Poisson oranlarını elde etmek için kullanılan ifadeler verilmiştir.



Şekil 6: MT modeli akış diyagramı

Şekil 6'da yapılan işlemlerin daha anlaşılır olması için akış diyagramı verilmiştir. Hacimsel oranları, elastisite modülü ve Poisson oranları yardımıyla matris ve takviyelerin katılık matrisi ve Eshelby tensörleri bulunur. Eşitlik (23)'teki MT modeli yardımıyla kompozitin homojen haldeki elastik davranışına ait dördüncü dereceden katılık matrisi elde edilir ve son olarak da bu matris yardımıyla mühendislik katsayıları elde edilir.

1.5. Öz-Uyumlu (SC) Model

SC modeli, kompozit malzemelerin elastik davranışını incelemek için MT gibi analitik ve yine aynı şekilde Eshelby tensörleri kullanılarak geliştirilen bir yöntemdir. SC modeli Eşitlik (31-33)'te verilmiştir [20].

$$C^{SC} = \sum_{r=0}^{r=\alpha} c_{\alpha} C^{\alpha} A_r^{SC} \quad (31)$$

$$A_r^{SC} = [I + S^{\alpha} C^{SC^{-1}} (C^{\alpha} - C^{SC})]^{-1} \quad (32)$$

$$C^{SC} = C^m + \sum_{r=1}^{r=\alpha} c_{\alpha} (C^{\alpha} - C^m) [I + S^{\alpha} C^{SC^{-1}} (C^{\alpha} - C^{SC})]^{-1} \quad (33)$$

Eşitlik (33)'de görüldüğü gibi SC modeli kapalı bir ifadedir. Bu yüzden hesaplama yapılırken yaklaşık bir ilk değer tahmininde bulunulup iteratif bir şekilde çözüme ulaşılır. Şekil 7'de Öz-Uyumlu model kullanılarak mühendislik katsayılarının elde edilmesi gösterilmiştir.



Şekil 7: SC modeli akış diyagramı

II. MATERYAL VE METOD

2.1. Malzeme

Bu çalışmada matris elemanı olarak geri dönüştürülmüş polipropilen (rPP), takviye malzemeleri olarak ise GnP ve OBC kullanılmıştır. Tablo 1-3'te kullanılan malzemelere ait bazı teknik özellikler verilmiştir [21].

Tablo 1: rPP'nin teknik özellikleri

Özellik	Değer
Yoğunluk	0,99 g/cm ³
Erime akış indeksi (g/10 dk (2,16 kg @ 190 °C))	37,6 g/10 dk
Erime Noktası	130 °C

Tablo 2. OBC'nin teknik özellikleri

Özellik	Değer
Elastisite modülü	2,785 MPa
Yoğunluk	0,877 g/cm ³
Poisson oranı	0,48
Erime akış indeksi (g/10 dk (2,16 kg @ 190 °C))	1
Erime Noktası	120 °C

Tablo 3. GnP'nin teknik özellikleri

Özellik	Değer
Elastisite modülü	1 TPa
Yoğunluk	2,25 g/cm ³
Poisson oranı	0,20
Yüzey alanı	500 m ² /g
Plaka çapı	<2 µm
Plaka kalınlığı	5 nm

OBC, GnP ve rPP kullanılarak, belirlenen ağırlık oranlarında oluşturulan kompozisyon tablosu Tablo 4'te verilmiştir. Bu oranlar literatür taraması yapıldıktan sonra Deney Tasarımı (Design of Experiment) ile elde edilen sonuçlara göre belirlenmiştir [21].

Tablo 4: Kompozisyon tablosu [21]

Kompozit Kodu	rPP	OBC	GnP
RPP	% 100	-	-
RO			-
ROG2			% 0,2
ROG3		% 5	% 0,3
ROG4	Denge		% 0,4

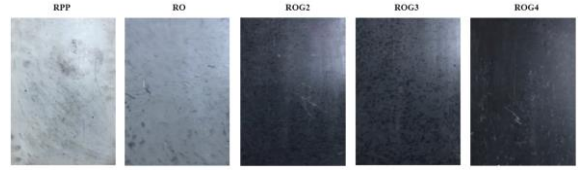
2.2. Tasarlanan kompozitlerin imalatı

Kompozit malzemeler geliştirilirken temel düşüncelerden biri, takviye elemanlarının avantajlı özelliklerinden istifade etmektir. Örneğin, mekanik özelliklerde artış için, takviye elemanlarına etkili bir gerilme transferi sağlayabilmek zorunludur. Etkili bir gerilme transferi için ise, takviye elemanları ile matrisin ara yüzey kalitesinin iyi olması ve takviye elemanlarının matris içerisinde homojen olarak dağılması gerekmektedir. Bu çalışmada kullanılan GnP'lerin üstün özellikleri olmasına rağmen yoğun Van der Waals kuvvetleri ve karbon atomlarının güçlü π-π etkileşimlerinden dolayı polimer matrisler içerisinde kümelenmeler meydana gelebilmektedir [22]. Bu durumu elimine etmek ve GnP'lerin matris ile bağlanmasını iyileştirmek için GnP'lere yüzey aktivasyonu işlemi yapılmalıdır. GnP yüzey aktivasyonu, oksidasyon veya polivinilpirolidon (PVP), vinil trimetoksisilan ve nitrik asit gibi kimyasallar yoluyla gerçekleştirilebilmektedir [22].

Bu çalışmada yüzey aktivasyonu işlemi, yüzde 65'lik bir konsantrasyona sahip nitrik asit ile yapılmıştır ve 1 gram GnP 60°C'de 10 ml'lik bir hacimde nitrik asit ile karıştırılmıştır. Karışımın asitliğini gidermek için karışım, distile su ile banyo işlemine tabii tutulmuştur ve sonrasında elde edilen GnP, 80 °C de 4 saat

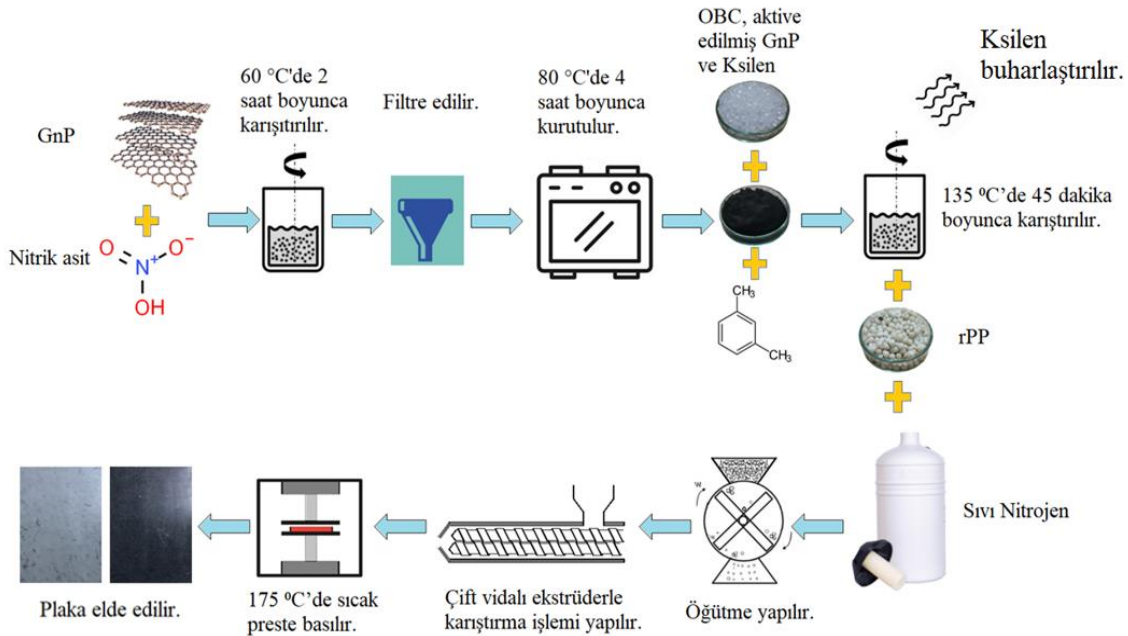
boyunca kurutulmuştur. Yüze aktifasyonunun bir sonucu olarak GnP yüzeyinde yeni fonksiyonel gruplar oluşur ve bu durum GnP'nin matrise daha verimli bir şekilde bağlanmasını sağlar. Bu işlem sonrasında, GnP'nin kompozit içerisinde homojen olarak dağıtılması için öncelikle OBC ile karıştırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu bağlamda, OBC ksilen yardımıyla çözündürülerek istenilen oranlarda homojen GnP ve OBC karışımları elde edilmiştir. Daha sonra, Tablo 4'teki oranlara dikkat edilerek rPP, GnP ve OBC malzemeleri sıvı azot altında yüksek hızlı bir öğütücü ile toz hale getirilmiştir. Toz haline getirilen karışımlar, çift vidalı ekstrüderde filament haline getirilmiş daha sonrasında otomatik kesici yardımı ile küçük granüller haline getirilmiştir. Granül halindeki parçalar sıcak pres yardımıyla mekanik

karakterizasyon testlerinde kullanmak üzere Şekil 8'de görüldüğü gibi plaka haline getirilerek kompozitlerin imalatı tamamlanmıştır.



Şekil 8: Sıcak pres ile elde edilen plaka şeklindeki numuneler (20 cm x 40 cm) [21]

Bu çalışmada izlenen kompozit imalat süreci Şekil 9'da detaylı olarak gösterilmektedir [21].



Şekil 9: Şematik olarak bütün imalat süreçleri [21]

2.3. Karakterizasyon

Mekanik karakterizasyon için elde edilen kompozit plaklarından kompozitlerin çekme özelliklerinin tayini için D638-14 standardına uygun bir şekilde su jeti ile test numuneleri elde edilmiştir. Bu süreçlere ait görseller Şekil 10'da verilmiştir.

Çekme deneyleri Shimadzu AG-x 50 kN ile, taramalı elektron mikroskobu gözlemleri ise Tescan Vega 3 SEM ile yapılmıştır.

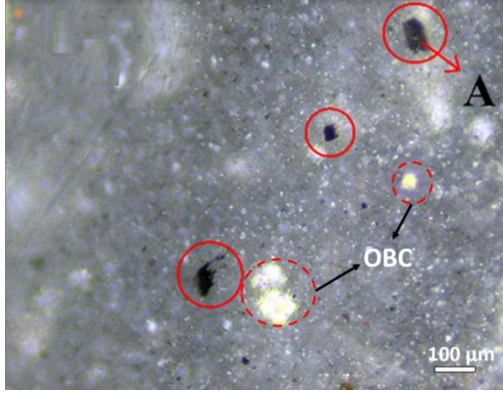


Şekil 10: Su jeti yardımıyla çekme testi numuneleri eldesi

III. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

3.1. Mekanik Karakterizasyon

Şekil 11, bu çalışmada oluşturulan kompozitlerin genel mikro yapılarını göstermektedir. Kompozit plakalar, gruplar halinde kesitlere ayrılmış ve soğuk bakalitleme yapıldıktan sonra optik mikroskopta mikroyapı incelemesi için parlatılmıştır. Şekil 11'de optik mikroskop incelemesi neticesinde kesikli dairelerin içerisine alınmış beyaz unsurların (Bknz. B) OBC olduğu tespit edilmiştir ve bu doğrultuda OBC'lerin çeşitli boyutlarda olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca, birçok noktada açık renkli olarak kompozitin kesidine OBC'lerin yayıldığı görülmüştür. Buna ek olarak, Şekil 11'de kırmızı sürekli daireler içerisinde A ile işaret edildiği üzere bir miktar GnP kümelenmelerine rastlanılmıştır. Daha sonra da belirtileceği üzere, bu kümelenmeler mekanik özelliklerde teorik hesaplamalardan sapmalara neden olmaktadır.



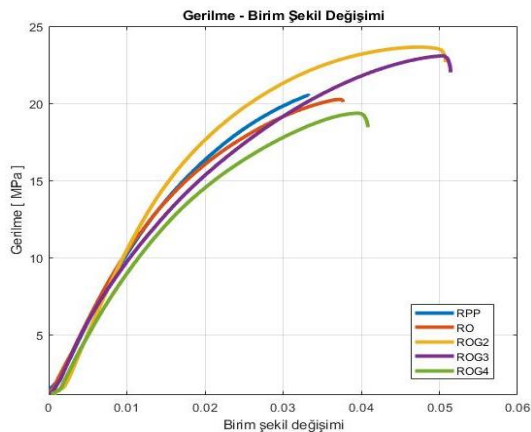
Şekil 11: ROG4 örneklerinin mikro yapısı x20 büyütme

Mikroskopik incelemeden sonra, bir sertlik ölçüm cihazı yardımıyla kompozitlerin sertlikleri Shore D skalasında ölçülmüş ve sonuçlar Tablo 5'te verilmiştir. Beklenildiği üzere OBC eklentisiyle kompozitlerde sertlik değerlerinde düşüş gözlemlenmiştir. Çünkü, elastomer grubunun bir üyesi olan OBC, düşük sertliğe sahip kauçuğumsu bir malzemedir. Öte yandan bu düşüş, GnP takviyesi ile ikame edilmiştir. Bunun nedeni, GnP'nin yüksek sertliği ve rijitliğidir. Ancak, grafen oranlarının % 0,3'ün ötesine geçmesiyle muhtemel kümelenmeler nedeniyle sertlik, düşüş eğilimine geçmiştir.

Tablo 5: Numunelere ait Shore D sertlik değerleri

Kompozit Kodu	Sertlik (Shore D)
RPP	68,40 ± 0,44
RO	65,33 ± 0,41
ROG2	66,86 ± 0,45
ROG3	68,00 ± 0,50
ROG4	66,30 ± 0,47

Sertlik ölçümünden sonra, çekme testleriyle kompozitlerin mekanik karakterizasyonu gerçekleştirilmiş ve sonuçlar Şekil 12'de verilmiştir.



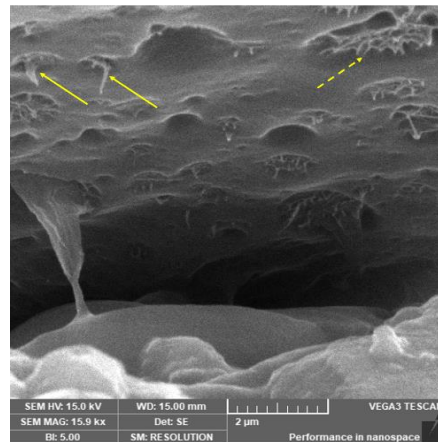
Şekil 12: Kompozitlere ait deneysel olarak elde edilen Gerilme – Birim Şekil Değişimi grafiği

Gerilme – Birim Şekil Değişimi grafikleriyle malzemelerin statik yük altındaki elastik ve plastik davranışları incelenmektedir. Bu ölçümler sayesinde bir malzemenin elastisite modülü, poisson oranı, akma dayanımı ve yüzde kopma uzaması gibi mekanik özellikleri belirlenebilmektedir. Çekme testinden elde edilen sonuçlarla malzemelerin çekme dayanımı, kopma uzaması ve elastisite modülü belirlenmiş ve sonuçlar Tablo 6'da verilmiştir.

Tablo 6: İmal edilen kompozitlerin çekme testi sonuçları

Numune Kompozit Kodu	Çekme Dayanımı (MPa)	Elastisite Modülü (MPa)	Kopma Uzaması (mm/mm)
RPP	20,89 ± 0,23	723,45 ± 32,23	0,026 ± 0,0047
RO	20,07 ± 0,14	700,82 ± 23,30	0,035 ± 0,0021
ROG2	21,75 ± 0,79	807,41 ± 32,27	0,044 ± 0,0042
ROG3	21,49 ± 0,35	801,48 ± 55,01	0,045 ± 0,0046
ROG4	17,74 ± 0,73	624,74 ± 42,36	0,038 ± 0,0036

OBC'ler büyük deformasyona uğrayabilen kopolimerler olduğundan kompozitlerin uzamasını artırabilmektedir [24]. Bu durumun bir sonucu olarak, OBC'ler rPP'lerin kopma uzamasını % 35 oranında arttırmışlardır. Öte yandan 8 OBC'lerin dayanımları termoplastiklere oranla düşüktür. Bu nedenle rPP ve RO numunelerine baktığımızda çekme dayanımı azalmıştır. Bu düşüşü kompanse etmek için GnP takviyesi yapılmıştır. GnP'nin ilavesiyle ROG2 ve ROG3 numunelerinin çekme dayanımı yaklaşık %10, elastisite modülü %15, kopma uzaması da %25 oranında artmıştır, bu durumda GnP'lerin üstün mekanik özelliklerinin katkısı büyüktür [25]. Ancak ROG4 numunesindeki çekme dayanımı düşüşünün, Şekil 11'da da gösterilen aglomerasyonlardan kaynaklandığı düşünülmektedir [26]. Ayrıca ROG4 grubuna ait bir numunenin kırılma yüzeyi de taramalı elektron mikroskobu ile incelenmiş ve Şekil 12'de verilmiştir.



Şekil 13: ROG4 grubuna ait bir numunenin SEM ile kırılma yüzeyini incelenmesi

Şekil 13'te sarı düz oklarla kırılma yüzeyine yayılan tekil GnP'ler gösterilirken kesikli çizgilerle ise kümelenmiş GnP'lere rastlanmıştır. GnP kümeleri malzeme içerisinde efektif stres transferi yerine stres konsantrasyonuna neden olarak prematüre kırılmalara yol açmaktadır.

3.2. Matematiksel Model Sonuçları

Bölüm 1.4 ve 1.5'te verilen ifadeler ve formülasyonlar kullanarak analitik olarak kompozitlerin elastik özellikleri modellenmiştir ve MATLAB® symbolic toolbox kullanılarak mühendislik katsayıları tahmin edilmiştir. MT ve SC modeli kullanarak elde edilen analitik sonuçlar Tablo 7 ve 8'de verilmiştir.

Tablo 7: MT modeli ile elde edilen mühendislik katsayıları (MPa)

Kompozit Kodu	E ₁₁	E ₂₂	E ₃₃	G ₂₃	G ₁₂	G ₁₃	V ₁₂	V ₁₃	V ₂₃
RO	635,5	635,5	635,5	224,1	224,1	224,1	0,4177	0,4177	0,4177
ROG2	763,6	763,6	689,1	254,8	224,3	224,3	0,3863	0,437	0,437
ROG3	827,4	827,4	714,1	270,2	224,3	224,3	0,3737	0,4442	0,4442
ROG4	890,9	890,9	738,0	285,6	224,4	224,4	0,3626	0,4503	0,4503

Tablo 8: SC modeli ile elde edilen mühendislik katsayıları (MPa)

Kompozit Kodu	E ₁₁	E ₂₂	E ₃₃	G ₂₃	G ₁₂	G ₁₃	V ₁₂	V ₁₃	V ₂₃
RO	631,0	631,0	631,0	223,0	223,0	223,0	0,413	0,413	0,413
ROG2	779,0	779,0	690,0	256,0	223,0	223,0	0,374	0,440	0,440
ROG3	874,0	874,0	723,0	274,0	224,0	224,0	0,352	0,456	0,456
ROG4	988,0	988,0	759,0	293,0	224,0	224,0	0,328	0,473	0,473

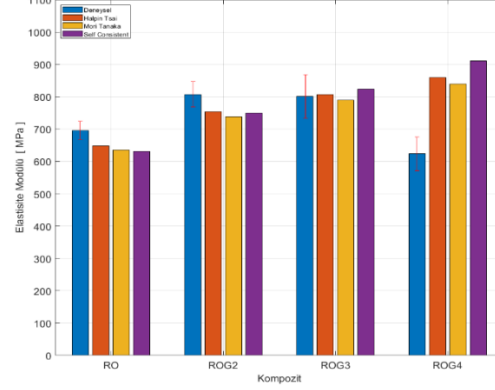
Analitik hesaplamalar yapılırken $E_{rPP} = 1100$ MPa, $\nu_{rPP} = 0,43$, $E_{OBC} = 2,7854$ MPa, $\nu_{OBC} = 0,48$, $E_{GnP} = 1$ TPa ve $\nu_{GnP} = 0,2$ olarak alınmıştır.

Deneyel sonuçlar ile mikromekanik model sonuçlarının karşılaştırılması Şekil 14 ve Şekil 15'te verilmiştir. RO, ROG2 ve ROG3 numunelerinin HT, MT ve SC modelleri kullanılarak elde edilen nümerik sonuçlarının deneyel sonuçlarla çok büyük bir tutarlılık gösterdiği gözlemlenmiştir. Bu durum kullanılan mikromekanik modellerin, nano takviyeli kompozitler için belirlenen ağırlık oranlarında önemli yakınlıkta avantajlı sonuçlar sağladığını göstermektedir.

Ancak ROG4 sonuçlarında hata oranının yüksek olduğu görülmüştür. Bunun temel sebebinin, GnP oranının artışıyla van der Waals kuvvetlerinin

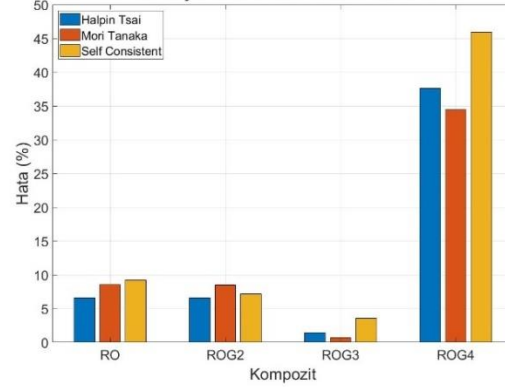
yoğunlaşarak aglomerasyonların yeterli düzeyde önlenememesi olduğu düşünülmektedir.

Deneyel Sonuçlarla Matematiksel Model Sonuçlarının Karşılaştırılması



Şekil 14: Kompozitlere ait deneyel ve matematiksel olarak elde edilen elastisite modüllerinin karşılaştırılması

Deneyel Sonuçlarla Matematiksel Model Sonuçları Arasındaki Hata Oranları



Şekil 15: Kompozitlere ait deneyel ve matematiksel elastisite modüllerinin hata oranlarının karşılaştırılması

IV. SONUÇ

Tek kullanımlık maske ve tulumların geri dönüştürülmesiyle elde edilen malzemelerle imal edilen katma değerli, ekonomik ve çevreci termoplastik kompozitler sürdürülebilir gelişme açısından büyük öneme sahiptir.

Bu çalışmada, kompozitler imal edildikten sonra, deneyel karakterizasyonlar gerçekleştirilmiş ve sonrasında birden fazla takviyeli kompozit malzemelerin HT, MT ve SC analitik modelleri kullanılarak, elastik özellikleri nümerik olarak belirlenmiştir. Çekme deneyi sonuçlarına göre GnP takviyesi kompozitlerin dayanımını ve elastisite modülünü artırırken, OBC ise kompozitlerin kopma uzaması değerlerini iyileştirmiştir. Ancak, GnP miktarının artışıyla mekanik özelliklerde düşüş gözlemlenmiştir. Bu durum yoğun van der Waals kuvvetleri ve $\pi - \pi$ etkileşimleri sonucunda GnP'lerin kümelenmesi ve heterojeniteye neden olmasıyla

ilişkilendirilmiştir. Bu durum mikromekanik modeller ile deneysel veriler arasında hataların gözlemlenmesine de neden olmaktadır. İmalat süreçleri optimize edildiğinde ve imalat koşulları iyileştirildiğinde bu hataların da azalması öngörülmektedir.

Mikromekanik modeller açısından ise HT, MT ve SC gibi Eshelby tensörlerine dayalı modeller kullanılarak elde edilen kompozit malzemelerin elastik özellikleri, düşük nano takviye oranlarında deneysel sonuçlarla büyük bir tutarlılık göstermiştir. Bu sonuçlardan hareketle, nano ölçekteki takviyelerin kullanıldığı kompozit malzemelerde bu yöntemlerin avantajlı sonuçlar verdiği görülmüştür. Bu modeller sayesinde ön tasarım aşamasında, deney yapmadan mikromekanik tabanlı analitik çözümlenmelerle hem zaman hem de iş gücü tasarrufu sağlanabilmektedir. Bu sonuç, gelişen teknoloji ve sürekli değişen ihtiyaçların olduğu günümüz için çok umut vericidir. Bu çalışmanın giriş kısmında verilen ve GnP'lere dayalı olarak kendi kendine iyileştirmenin sağlanması, yine yazarlarca diğer bir makalede detaylıca incelenmiştir.

TEŞEKKÜR

Bu araştırma, İstanbul Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Ofisi (İTÜ BAPSIS) tarafından MAB-2021-42811 hibesi kapsamında desteklenmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] World Health Organization. "Rational use of personal protective equipment for coronavirus disease (COVID-19) and considerations during severe shortages. Geneva: World Health Organization; 2020.[cited 2020 May 8]." (2020).
- [2] K. Selvaranjan, S. Navaratnam, P. Rajeev, N. Ravintherakumaran, Environmental challenges induced by extensive use of face masks during COVID-19: a review and potential solutions, *Environ. Challenge*. 3 (2021).
- [3] M.P. Luda, G. Ragosta, P. Musto, D. Acierno, L. Di Maio, G. Camino, V. Nepote, Regenerative recycling of automotive polymer components: poly(propylene) based car bumpers, *Macromol. Mater. Eng.* 288 (2003).
- [4] S.H. Jafari, A.K. Gupta, Impact strength and dynamic mechanical properties correlation in elastomer-modified polypropylene, *J. Appl. Polym. Sci.* 78 (2000).
- [5] Han, S., Zhang, T., Guo, Y., Li, C., Wu, H., & Guo, S., Brittle-ductile transition behavior of the polypropylene/ultra-high molecular weight polyethylene/olefin block copolymers ternary blends: Dispersion and interface design. *Polymer*, 182, (2019).
- [6] Liang, J. Z., Impact fracture behavior and morphology of polypropylene/graphene nanoplatelets composites. *Polymer Composites*, 40(S1), E511-E516, (2019).
- [7] Yunbo, Luan , Gao, Feilong , Li, Yongcun , Yang, Jinglei , Hu, Yinchun , Guo, Zhangxin , Wang, Zhihua , Zhou, Aijuan., Healing Mechanisms Induced by Synergy of Graphene-CNTs and Microwave Focusing Effect for the Thermoplastic Polyurethane Composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 106, (2017).
- [8] M. Monti, M.T. Scrivani & V. Gianotti, Effect of SEBS and OBC on the impact strength of recycled polypropylene/talc composites, *Recycling*. 5, (2020).
- [9] S. Yi , S. Xu , Y. Li , W. Gan , X. Yi , W. Liu , Q. Wang , H. Wang & R. Ou, Synergistic toughening effects of grafting modification and elastomer-olefin block copolymer addition on the fracture resistance of wood particle/polypropylene/ elastomer composites, *Mater. Des.* 181, (2019).
- [10] Liang, J.Z., Q. Du, G.C.P. Tsui & C.Y. Tang, Tensile properties of graphene nano- platelets reinforced polypropylene composites, *Compos. Part B Eng.* 95 (2016).
- [11] Liang, J.Z., Effects of tension rates and filler size on tensile properties of polypropylene/graphene nano-platelets composites, *Compos. Part B Eng.* 167, (2019).
- [12] Shokrieh, M. M., Esmkhani, M., Shokrieh, Z., & Zhao, Z., Stiffness prediction of graphene nanoplatelet/epoxy nanocomposites by a combined molecular–micromechanics method. *Computational materials science*, 92, 444-450. (2014).
- [13] Arefi, M., Tabatabaeian, A., & Mohammadi, M., Bending and stress analysis of polymeric composite plates reinforced with functionally graded graphene platelets based on sinusoidal shear-deformation plate theory. *Defence Technology*, 17(1), 64-74, (2021).
- [14] Thorvaldsen, T., "Modelling the elastic stiffness of nanocomposites using the Mori-Tanaka method", (2015).
- [15] MIT, asd *Mean-field homogenization - Massachusetts Institute of Technology*. (n.d.). Retrieved November 24, 2022, from <https://abaqus-docs.mit.edu/2017/English/SIMACAEMATRefM/ap/simamat-c-meanfieldhomogenization.htm>, (2022).
- [16] Kırış, Ahmet. *Hasarlı Malzemelerin Mikro Elastik Teorilerle Modellenmesi Ve Eshelby Tansörleri*. Diss. Fen Bilimleri Enstitüsü, (2007).
- [17] Shokrieh, M. M., Esmkhani, M., Shokrieh, Z., & Zhao, Z., Stiffness prediction of graphene nanoplatelet/epoxy nanocomposites by a combined molecular-dynamics–micromechanics method. *Computational materials science*, 92, 444-450, (2014).
- [18] Jain, A., Modified Mori-Tanaka methods for damage modelling of short fibre reinforced

- composites. **In 22nd International Conference on Composite Materials, Melbourne**, (2019).
- [19] Becker, F., & Hopmann, C., Stiffness Estimates for Composites with Elliptic Cylindrical Voids. *Materials*, 13(6), 1354, (2020).
- [20] Kanaun, S. K., & Levin, V., *Self-consistent methods for composites: Vol. 1: Static problems* (Vol. 148). **Springer Science & Business Media**, (2007).
- [21] Okan, C., Kaya, R., Irez, A. B., & Cebe, E., Effect of the Graphene Nanoplatelets (GnPs) on the Mechanical Properties in Recycled PP-Based Hybrid Composites. **In Mechanics of Composite, Hybrid and Multifunctional Materials, Fracture, Fatigue, Failure and Damage Evolution**, Volume 3 (pp. 23-28). Springer, Cham., (2022).
- [22] Yang, W., Jiang, Z., Hu, X., Li, X., Wang, H., & Xiao, R., Enhanced activation of persulfate by nitric acid/annealing modified multi-walled carbon nanotubes via non-radical process. *Chemosphere*, 220, 514-522, (2019).
- [23] Irez, A. B., Okan, C., Kaya, R., & Cebe, E., Development of recycled disposable mask based polypropylene matrix composites: Microwave self-healing via graphene nanoplatelets. *Sustainable Materials and Technologies*, e00389, (2022).
- [24] G. Liu, X. Zhang, X. Li, H. Chen, K. Walton, D. Wang, Correlation of miscibility and mechanical properties of polypropylene/olefin block copolymers: effect of chain composition, *J. Appl. Polym. Sci.* 125, (2012).
- [25] Jun, Y. S., Um, J. G., Jiang, G., & Yu, A., A study on the effects of graphene nano-platelets (GnPs) sheet sizes from a few to hundred microns on the thermal, mechanical, and electrical properties of polypropylene (PP)/GnPs composites. *Express Polymer Letters*, 12(10), 885-897, (2018).
- [26] Irez, A. B., Bayraktar, E., & Miskioglu, I., Fracture toughness analysis of epoxy-recycled rubber-based composite reinforced with graphene nanoplatelets for structural applications in automotive and aeronautics. *Polymers*, 12(2), 448, (2020).