

Elektrikli Araçlarda Batarya Kutusu İmali İçin Termal Özellikleri İyileştirilmiş Hibrit Polimer Kompozitlerin Geliştirilmesi ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi

Development of Hybrid Polymer Composites with Improved Thermal Properties and Investigation of Their Mechanical Properties for Battery Module Case Manufacturing in Electric Vehicles

Emrullah CEBE¹, Alaeddin Burak IREZ¹

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

Öz

Elektrikli araçlar, ulaşımın sürdürülebilirliği için oldukça önemlidir ve içten yanmalı motorlu araçlar gibi fosil yakıtlar kullanmadıklarından çevreye zararlı gaz salınımında bulunmamaktadırlar. Elektrikli araçların bu özelliğinden faydalanmak için kullanıcılarını teşvik etmek amacıyla çeşitli çalışmalar yapılmaktadır. Bu çalışmada, elektrikli araçlardaki batarya kutusu üretimi için termal iletkenliği ve darbe direnci iyileştirilmiş polimer esaslı hibrit kompozit bir malzeme geliştirilmesi amaçlanmıştır. Yaygın kullanımı ve üretim kolaylığı nedeniyle matris olarak Poliamid 6 (PA6) kullanılmış, termal iletkenliğini artırmak için ise hegzagonal bor nitür (hBN) ve grafen nanopulcuk (GnP) kullanılmıştır. Bu malzemelere ek olarak, zeminden kaynaklanabilecek potansiyel darbe hasarı durumunda dayanıklılığı artırmak için bir stiren-etilen-bütadien-stiren (SEBS) elastomer takviyesi eklenmiştir. Kompozitler ekstrüzyon ve enjeksiyon kalıplama ile üretildikten sonra, numunelerin mekanik testleri; üç nokta eğme ve Izod darbe dayanımı testleriyle yapılmıştır. Kütlece %30 hBN kullanılması durumunda eğilme dayanımı ve modülünde sırasıyla %22 ve %101.1'lik bir iyileşme sağlanmıştır. Kütlece %2.5 GnP kullanılması durumunda eğilme dayanımı ve modülü değerlerinde sırasıyla %14.1 ve %55.6'lık bir iyileşme sağlanmıştır. Kütlece %5 SEBS kullanıldığında darbe dayanımını değerinin %58.5 arttığı tespit edilmiştir. Ayrıca termal karakterizasyon için diferansiyel taramalı kalorimetre analizleri ve termal iletkenlik ölçümleri yapılmıştır. Kütlece %30 hBN eklendiğinde termal iletkenliğin %194.3 arttığını görülmüştür. Daha sonra, malzemelerde hasar mekanizmalarını incelemek için kırılma yüzeyleri taramalı elektron mikroskopuyla (SEM) incelenmiştir. Son olarak, Halpin Tsai (HT) yaklaşımı kullanılarak kompozitlerin mikromekanik modelleri kurulmuştur. Bu modellerin doğruluğunu tespit etmek için ise deneysel verilerle karşılaştırma yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Elektrikli araçlar, Batarya kutusu, Hegzagonal bor nitür, Grafen nanopulcuk, Hasar mekanizmaları

Abstract

In the realm of transportation sustainability, electric vehicles play a crucial role. The aim of this article was to create a hybrid composite material using polymers that would have enhanced heat conductivity and impact resistance. This material would be used to manufacture battery casings for electric cars. Polyamide 6 (PA6) was selected as the matrix material owing to its convenient manufacturing process and extensive application. Additionally, hexagonal boron nitride (hBN) and graphene nanoplatelets (GnP) were incorporated to enhance the thermal conductivity of the matrix. Furthermore, to enhance the structural integrity against potential ground impact damage, a styrene-ethylene-butylene-styrene (SEBS) elastomer reinforcement was used alongside the aforementioned elements. Following the extrusion and injection molding processes, the composites underwent mechanical testing using three-point bending and Izod impact tests. When 30 wt.% hBN was added, there was a 22% improvement in flexural strength and a 101.1% improvement in flexural modulus. Similarly, when 2.5 wt.% GnP was added, there was a 14.1% improvement in flexural strength and a 55.6% improvement in flexural modulus. Then, thermal analyses were performed through Differential Scanning Calorimetry (DSC) and thermal conductivity measurements. Furthermore, it was observed that the addition of 30 wt.% hBN resulted in a significant increase of 194.3% in thermal conductivity. Subsequently, the fracture surfaces were subjected to scanning electron microscopy (SEM) in order to investigate the underlying causes of material damage subsequent to failure. The Halpin-Tsai (HT) micro-mechanical model was used to estimate the modulus of the composites.

Keywords: Electric cars, Battery case, Hexagonal boron nitride, Graphene nanoplatelets, Failure mechanisms

I. GİRİŞ

İklim değişikliği günümüzün en önemli problemlerinden biridir ve fosil yakıtların kullanılması sonucunda ortaya çıkan karbondioksit emisyonu bu problemin ana nedenlerinden biridir. 1970'ten bu yana CO₂ emisyonları yaklaşık %90 artış gösterirken, ulaşım sektörü bu emisyonunun %25'inden sorumlu olarak karşımıza çıkmaktadır [1,2]. Karbondioksit emisyonunu azaltmak için otomotiv endüstrisinde köklü değişiklikler yapılmaktadır. İçten yanmalı motorlardan elektrik motorlarına geçiş, bu değişikliklerin en önemlilerinden biri olarak kabul edilmektedir. İçten yanmalı motorlu araçlara kıyasla, elektrikli araçlar düşük karbon salınımına neden olurlar ve aynı zamanda yakıt verimleri yüksek olup daha az karmaşık yapıya sahiptirler. Öte yandan, elektrikli araçlar içten yanmalı motorlu araçlara kıyasla daha pahalıdır. Birçok ülke yönetimi, elektrikli araçların kullanımını teşvik etmek için elektrikli araçlara yönelik vergileri düşürme ve elektrikli araçlar için ayrılmış otopark alanları oluşturma gibi avantajlar sağlamaktadır. Ayrıca, Avrupa Birliği 2035'ten itibaren benzinli ve dizel araçların satışının yasaklanmasına karar vermiştir [3]. Bu karar, elektrikli araçlara geçişi hızlandırmayı ve karbon emisyonu kaynaklı iklim değişikliği ile mücadeleyi hızlandırmayı amaçlamaktadır. Bu karar paralelinde elektrikli araçların kullanımının artışı ve araç maliyetlerinin düşüşü beklenmektedir. Tüm bu durumlar göz önüne alındığında, elektrikli araçların öneminin gün geçtikçe daha da artacağı öngörülmektedir.

Otomotiv sektöründeki köklü değişiklikler ve sektörle ilgili alınan kararlar ile birlikte otomotiv firmalarının da yatırımları elektrikli araçlara doğru yönelmektedir. Tesla, Lucid Motor ve TOGG gibi doğrudan elektrikli araçlara yoğunlaşan firmaların yanında Ford, BMW ve Volkswagen gibi firmalar da elektrikli araçlara önemli yatırımlar yapmaktadır. Yatırım odağının bu yöne kaymasıyla beraber elektrikli araçlar için en kritik konulardan biri olan batarya teknolojisiyle ilgili çalışmalar da hızla ilerlemektedir. TOGG, Gemlik'te açtığı araç üretim tesislerinin yanı sıra bir batarya geliştirme ve üretim kampüsü de açarak bu alanda önemli adımlar atmıştır [4]. Batarya teknolojisindeki şarj süresi, sürüş menzili gibi kısıtlar ve müşterinin elektrikli araçlarda düşük maliyet beklentileri otomobil üreticilerini farklı türde elektrikli araçlar üretmeye itmektedir. Bu sebeple araç üretiminde şarj süresi, sürüş menzili, yakıt fiyatları ve çevresel kaygılar gibi değişkenler de dikkate alınmaktadır. Bu değişkenler, elektrik enerjisinin depolanma yöntemiyle doğrudan ilişkilidir. Elektrikli araçlar, içten yanmalı motorlu araçlardaki yakıt tankının rolünü üstlenen yüksek voltajlı bataryalar kullanır. Bu bataryalar, elektrik motoru için elektriğin depolanmasından direkt olarak sorumludur. Elektrikli araçlarda, yüksek enerji yoğunluğunu sağlayabilme ve uzun kullanım ömürleri nedeniyle, lityum iyon piller (LİP) batarya sistemlerinde sıklıkla kullanılmaktadır. Lityum iyon

pillerin şarj edilebilir olması ile beraber temiz enerjinin kullanımında da kritik bir rolü vardır [5]. Özellikle elektrikli araçların kullanımının yaygınlaşması için pillerin yüksek verimlilikte çalışmaları beklenmektedir. Bu bağlamda pil verimliliği ile pil çalışma sıcaklığı arasında önemli bir ilişki vardır. Piller normal şartlarda 15 ile 40°C arasında çalışmaktadır ($\pm 5^\circ\text{C}$) ve bu aralık dışında kullanıldıklarında, pil ömrü ve performansı önemli ölçüde düşer [6]. Ayrıca, Joule etkisi nedeniyle içerisinden akım geçen malzemelerde ısınma gözlenir ve dolayısıyla pillerin çalışması esnasında sıcaklık artışı gözlenmektedir. Pil çevresindeki sıcaklık, çalışma esnasında güvenli çalışma eşik değerlerinden ($T > 90^\circ\text{C}$) daha yüksekse, araçta bir kaza riski meydana gelmektedir [6]. Bu riskle başa çıkmak için, araçlar pil sıcaklığını belirli bir aralıkta tutmak için bir pil yönetim sistemi (BMS) ile donatılmıştır. Bu teknoloji, aşırı ısınmış pilin sıcaklığını düşürmek için hava ile soğutma benzeri bir yaklaşımı kullanır. Ancak, hava ile soğutma termal iletkenliğin düşük olduğu malzemelerde teknik beklentileri karşılamayabilir. Bu durumda, soğutma için alternatif bir yöntem ise kanallar aracılığıyla soğutucu akışkan dolaşımı yapmaktır. Bu yaklaşım daha iyi bir soğutma performansı sağlar ancak yüksek maliyeti de beraberinde getirir. Pil sisteminde soğutma bir bütün olarak düşünüldüğünde; pillerin, batarya kutusunun ve tüm elektronik bileşenlerin termal iletkenlik katsayısı ısı transferi açısından oldukça önemlidir.

Piller, araçta batarya kutusu adı verilen bir bölmede bulunur. Batarya kutusu, batarya sisteminde hem termal özellikler hem de mekanik özellikler açısından oldukça önemlidir. Endüstride batarya kutusu malzemesi olarak alüminyum sıklıkla kullanılmaktadır. Alüminyum hem yüksek termal iletkenliğe sahip olması hem de ucuzluğu nedeniyle tasarım açısından isterleri önemli ölçüde karşılamaktadır [7]. Diğer bir ister ise batarya kutusunun hafifliğidir. Elektrikli araçlar, içten yanmalı motora sahip araçlara göre yaklaşık 300 kg daha ağır gelmektedir. Bu farkın kaynağı, araçlarda kullanılan batarya sistemidir [8]. Bu durumda alüminyuma alternatif olarak polimer kompozit malzemelerin kullanılması, termal ve mekanik özellikleri sağlamanın yanı sıra ağırlık azaltımı konusunda da faydalı sonuçlar doğuracaktır. Batarya termal yönetim sistemi için, soğutma hem taşınım hem de iletimle gerçekleştiği için batarya kutusunun termal iletkenliği önemli bir parametredir. Literatürde farklı bileşenler kullanılarak termal iletkenliği iyileştirmeye yönelik birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalarda genellikle termal iletkenliği artıran takviyelere odaklanılmıştır. Seramik esaslı olarak; bor nitrür (BN) [9] ve silika [10], karbon esaslı olarak; grafit [11] ve grafen oksit [12] termal iletken takviye malzemesi olarak yaygın olarak kullanılmaktadır. Temel2019 senesinde yaptığı bir çalışmada, parafine %7 oranında Grafen nanopulcuk (Graphene nanoplatelet/GnP) ekleyerek, sıvı ve katı

fazdaki termal iletkenlikteki değişimi incelemiştir. Elde ettiği sonuçlara göre, sıvı ve katı fazda termal iletkenliğin sırasıyla %130 ve %230 iyileştiğini tespit etmiştir [13]. Yüksek termal iletkenlik sunan dolgulardan biri de grafen benzeri atomik yapısı nedeniyle genellikle beyaz grafen olarak da adlandırılan hegzagonal bor nitrür (hBN)'dür. hBN katmanlı yapısı nedeniyle polimer matrisinde termal iletim ağları oluşturur ve ısı transferi sırasında termal direncin azalmasına neden olur [14]. hBN'nin oda sıcaklığında yaklaşık 550 W/mK düzlem içi termal iletkenlik değerine sahip olduğu tespit edilmiştir [15]. Bu özelliğinden dolayı hBN, termal iletkenliğin iyileştirilmesi ile ilgili çalışmalarda kullanılan önemli bir takviye malzemesidir. hBN'nin farklı kompozitlerdeki termal performansını inceleyen çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Gong ve arkadaşları tarafından yürütülen bir çalışmada, karboksil uçlu polibütadien (CTPB) ve hBN ile takviye edilen epoksinin termal iletkenliği incelenmiştir. Bu çalışma kapsamında, hBN'nin yüzey aktivasyonu için silan kullanılmış ve işleme tabi tutulmayan grup da kontrol grubu olarak incelenmiştir. hBN miktarlarının %10 ile %40 arasında değiştiği durumlar için termal iletkenlik ölçümleri yapılmıştır. Yüzey aktivasyonu yapılmayan kütlece %40 hBN takviyesi için termal iletkenliğin yaklaşık %200 arttığı, silan aktivasyonu yapılan kütlece %40 hBN takviyesi için ise termal iletkenliğin yaklaşık %300 arttığı gözlemlenmiştir [16].

Termal yönetim dışında, araç güvenliği de otomotiv endüstrisinde büyük öneme sahiptir. Otomobil kazalarından sonra, batarya sistemi hasar görebilmektedir. Kazalara bağlı hasar riskini azaltmak için, pillerin batarya kutusuna montajı kritik bir ve montaj genellikle iki farklı teknikte yapılır. İlk tekniğe göre, piller aracın ortasına T şeklinde monte edilir ve dış etkenlerden korunur. Ancak, bu düzenleme, araç içindeki alanın azalması nedeniyle yolcu konforunun azalmasına neden olabilmektedir. İkinci teknikte ise montaj katmanlar halinde yapılır. Bu yöntemle, yolcu için kalan iç mekân, T tasarımına kıyasla daha geniştir. Ancak, bu yöntemde, aracın zeminle olan mesafesi azalmaktadır. Azalan mesafe ile zeminden gelebilecek darbelerin hasara neden olması söz konusudur. Bu nedenle, batarya kutusunda kullanılan malzemenin olası hasar durumlarına karşı darbe dayanımı son derece önemlidir. Literatürde darbe dayanımını iyileştirmek üzerine yapılan çalışmalar bulunmaktadır. Gong ve arkadaşları, hBN miktarı arttıkça, hBN partiküllerinin matris malzemesine göre yüksek rijitliği nedeniyle kompozitin elastisite modülünü arttırdığını, ancak çekme, eğilme ve darbe dayanımının takviyesiz matris malzemesine göre kademeli olarak azalttığını gözlemlemiştir. Kütlece %40 hBN kullanıldığında, takviyesiz matrise göre çekme dayanımının %32, eğilme dayanımının %47 ve darbe direncinin %61 azaldığı görülmüştür [16]. Darbe dayanımındaki düşüşü telafi etmek için ise enerjiyi sönmüleme konusunda etkili olan elastomerler yaygın olarak

kullanılmaktadır. Stiren Etilen Bütilen Stiren (SEBS), yüksek darbe dayanımı nedeniyle en sık kullanılan elastomerik malzemelerden biridir. Okan ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, matris olarak kullanılan polipropilenin yanında kütlece %5 oranında SEBS kullanılması durumunda elde edilen termoplastik hibrit kompozitin darbe sönmüleme performansının iyileştiği gözlemlenmiştir [17]. Öte yandan, SEBS tek başına kullanıldığında matrisle arayüzey bağlanma kuvvetinin kısıtlı oluşu nedeniyle, SEBS'in diğer malzemelerle arayüzey aktivasyonunu iyileştirmek için maleik anhidrit aşılantı polietilen (MAPE) kullanılmaktadır. Gao ve arkadaşları, kütlece %5 maleik anhidrit ile modifiye edilmiş SEBS'in termoplastik poliüretan karışımına eklenmesiyle darbe dayanımının %100 arttığını gözlemlemiştir [18]. Bir diğer takviye malzemesi olarak kullanılan GnP, yüksek mukavemeti ve rijitliği sayesinde polimerik malzemelerle beraber kullanıldığında matriste bir omurga görevi görür ve bu sayede mekanik özellikleri olumlu etkiler [19]. Okan ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada, homojen bir şekilde matrisle karıştırılmış GnP'nin eğilme dayanımı ve modülünü iyileştirdiği tespit edilmiştir [17].

Otomotiv sektöründe kullanılan polimerler incelendiğinde, poliamidler, mühendislik polimerleri arasında önemli bir grubu oluşturur. Poliamid ailesi içerisinde Poliamid 6 (PA6), beyaz eşya ve otomotiv gibi sektörlerde üretim kolaylığı, avantajlı mekanik özellikleri ve yüksek kimyasal direnci sayesinde sıklıkla kullanılmaktadır [20].

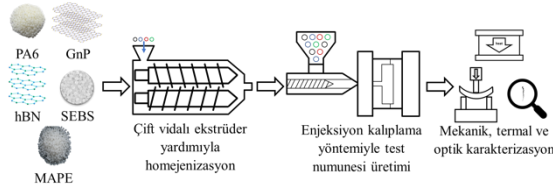
Yukarıda da önemli örnekleri verildiği üzere, hBN ve GnP'nin ayrı ayrı takviyesinin polimer kompozitlerin ısı ve mekanik karakteristiklerini nasıl etkilediğini inceleyen çalışmalar sıklıkla görülmüştür. Ayrıca, polimer matrislerine elastomerlerin eklenmesi sonucunda darbe direncinin değişimine yönelik çalışmalar da görülmüştür. Ancak, yazarlar, hBN, GnP ve SEBS takviyelerinin yüzey aktivasyon ajanlarıyla birlikte poliamid 6 matrisinde eş zamanlı kullanıldığı kompozitlerle ilgili çalışmalara rastlamamıştır. Ayrıca bu şekildeki hibrit kompozitlerde çoklu takviyelerin eş zamanlı kullanılmasıyla birlikte ortaya çıkabilecek sinerjik etkileri sistematik olarak inceleyen bir araştırma da bulunmamaktadır. Bu nedenle, bu çalışma, kompozitlerin imalatı ve sonrasında deneysel karakterizasyonlarının gerçekleştirilmesiyle elde edilecek sonuçlarla birlikte bu alandaki boşluğu doldurmayı amaçlamaktadır.

Bu çalışmada, üretilecek kompozit bileşimlerin belirlenmesinin ardından, PA6 matrisi, hBN, GnP, SEBS ve MAPE ile birlikte çift vidalı ekstrüder kullanılarak karıştırılmış ve kompozitler granül şeklinde imal edilmiştir. Daha sonra, bu granüllerden plastik enjeksiyon yöntemi kullanılarak test numuneleri üretilmiştir. Numunelerin imalatından sonra, üç nokta eğme testi, Izod darbe dayanımı testi, DSC analizleri,

termal iletkenlik ölçümleri ve mikroskopik gözlemler de dahil olmak üzere deneysel karakterizasyonlar gerçekleştirilmiştir. Sonrasında kompozitlerin mekanik özellikleri mikromekanik modeller kullanılarak belirlenmiş ve elde edilen sonuçlar deneysel verilerle karşılaştırılmıştır.

II. MATERYAL VE METOD

Bu çalışmanın genel ve basitleştirilmiş akış şeması Şekil 1’de verilmiştir. Bu çalışmada kullanılan PA6, Eurotec firmasından NB40 NL FY50 koduyla temin edilmiştir. PA6 malzemesi 1.16 g/cm³ yoğunluğa sahip olup, UL94 standardına göre yanıcılık açısından V2 olarak sınıflandırılmaktadır.



Şekil 1. Kompozit imalat ve karakterizasyon akış şeması

h-BN, Nanografi®’den NG04CO0301 ürün koduyla temin edilmiştir. Yoğunluğu 2.3 g/cm³, saflık derecesi %99.7’dir. GnP ise Nanografi® firmasından NG01GNP0109 koduyla tedarik edilmiştir. GnP’nin yoğunluğu 2.2 g/cm³, saflık değeri %99.9’dur. Yüksek grafen oranlarının beraberinde getirdiği aglomerasyon oluşturma ihtimalini azaltmak için COOH ile yüzey aktivasyonu gerçekleştirilmiş GnP’ler kullanılmıştır. SEBS G401.A82.N koduyla Elastron TR firmasından temin edilmiştir. SEBS, 0.89 g/cm³ yoğunluğa sahiptir. Bu çalışmada, SEBS ile PA6 arasındaki arayüzey etkileşimini arttırmak için yüzey aktivasyon ajanı olarak maleik anhidrit enjekte edilmiş polietilen (MAPE) kullanılmıştır. MAPE, ATABOND-1550 koduyla TMB Polimer firmasından temin edilmiştir. Çalışmanın deneysel kısmında, kompozit imalinde kullanılan takviyelerin, kompozitlerin mekanik ve termal özelliklerine etkisinin incelenmesi hedeflenmiştir. Bu sebeple 5 farklı kompozisyon belirlenmiştir. İlk olarak, takviyelerin yer almadığı %100 PA6 matris, referans grup olarak belirlenmiştir. Sonraki kompozisyonların hepsinde PA6 matris olarak kullanılmış olup, kütlece yüzde miktarı denge olacak şekilde ayarlanmıştır. PSM kompozisyonunda ise kütlece %5 oranında SEBS ve MAPE eklenerek SEBS’in etkisinin gözlemlenmesi hedeflenmiştir. Diğer bütün kompozisyonlarda SEBS ve MAPE aynı oranda kullanılmıştır. PHS30 kompozisyonunda ek olarak kütlece %30 oranında hBN kullanılmıştır. Bu kompozisyonla hBN’nin etkilerinin tesbiti hedeflenmiştir. Bir diğer kompozisyon olan PHS35 ile hBN’nin kütlece oranı %30’dan %35’e çıkartılmıştır. Bu kompozisyon ile hBN miktarının artışının deneysel sonuçlara etkisinin tespiti hedeflenmiştir. Son kompozisyonunda ise içeriğinde kütlece %30 hBN kullanılan kompozisyona ek olarak kütlece %2.5 oranında GnP takviyesi yapılmıştır. Bu kompozisyonla

da GnP’nin kompozite etkisinin incelenmesi hedeflenmiştir. Kompozit kompozisyonları belirlendikten sonra imalat aşamasına geçilmiştir. Hazırlanan kompozitlerin isimleri ve içerikleri Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Kompozisyon tablosu [21]

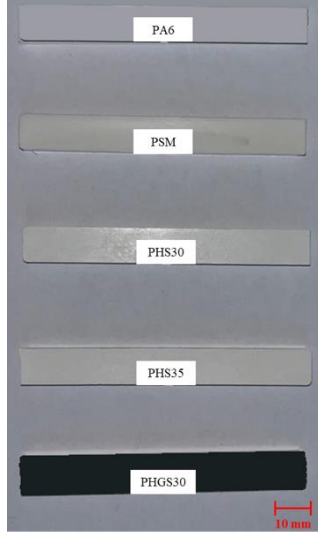
Kompozisyon Adı	PA6 (%k.)	hBN (%k.)	GnP (%k.)	SEBS (%k.)	MAPE (phr)
PA6	100	-	-	-	-
PSM		-	-	5	5
PHS30	Denge	30	-	5	5
PHS35		35	-	5	5
PHGS30		30	2.5	5	5

Kompozitlerin imalat süreci iki aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada malzemelerin homojen bir şekilde karıştırılması amacıyla Leistritz ZSE 27 MAXX marka çift vidalı ekstrüder kullanılıp her kompozit için bileşik oluşturulmuştur. Kullanılan çift vidalı ekstrüderin vida çapı 28.3 mm, kovan çapı 28.5 mm ve vida uzunluğu 1358.4 mm’dir. Elde edilen bileşikler kullanılarak ikinci aşamada Bole BL90EKH/C220 marka cihaz kullanılarak plastik enjeksiyon yöntemiyle üretim gerçekleştirilmiştir. Kullanılan plastik enjeksiyon cihazının vida çapı 28.4, vida uzunluk/çap oranı 20’dir. Çift vidalı ekstrüderde homojen bir şekilde karıştırılan kompozisyonlar granül şeklinde enjeksiyon cihazına beslenmiştir. Yapılması planlanan testlerin standartlarına göre numuneler üretilmiştir.

Üretim aşamaları tamamlandıktan sonra deneysel karakterizasyonlar gerçekleştirilmiştir. Numunelere yoğunluk ölçümü, diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) analizi, termal iletkenlik ölçümü, üç nokta eğme testi ve Izod darbe dayanımı testi yapılmıştır. Yapılan tüm testler oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Malzemelerin yoğunlukları ISO 1181-1 standardına uygun olarak ölçülmüştür. Ölçüm için MatsuHaku GP-300E model cihaz kullanılmıştır.

Malzemelerin ısı davranışını incelemek için DSC analizi yapılmıştır. Referans bir numune kullanılarak yapılan incelemede, DSC cihazında iki numune varken sıcaklık artırılarak veya azaltılarak numuneler arasındaki sıcaklık farkı kontrol edilir. Cihazdan ısı enerjinin sıcaklıkla nasıl değiştiğini gösteren bir ısı akısı-sıcaklık eğrisi elde edilmiştir. Bu eğriyi kullanarak camı geçiş sıcaklığını bulabilmek için, oda sıcaklığında itibaren eğrinin eğiminin ilk defa gözle görülür şekilde değişim gösterdiği noktanın başlangıç ve bitiş noktalarını bağlayacak şekilde bir “onset” çizgisi çekildikten sonra bu çizginin orta noktasının eğri üzerinde tekabül ettiği noktaya karşılık gelen

sıcaklık değeri camsı geçiş sıcaklığı olarak belirlenmiştir. Termal iletkenlik ölçümleri için disk şeklindeki numuneler kullanılmıştır. Numunelerin çapı 25.4 mm ve kalınlığı 1 mm'dir. Isıl iletkenlik testi TA-Discovery Xenon Flash DXF 200 model test cihazı kullanılarak yapılmıştır. Her bileşim için termal iletkenlik testini gerçekleştirmek üzere üç set numune kullanılmıştır.



Şekil 2. Üç nokta eğme testi numuneleri

Üç nokta eğme testi ISO 178 standardına uygun olarak hazırlanan (boy 80 mm, en 10 mm ve kalınlık 4 mm) Şekil 2'deki numunelerle 50 mm/dak hızla yapılmıştır. Test sonucunda malzemenin eğilme dayanımı, kopma birim şekil değişimi ve eğilme modülü değerleri tespit edilmiştir. Üç nokta eğme testi için Hegewald & Peschke model test cihazı kullanılmıştır. Her kompozisyon için üçer set numune kullanılarak üç nokta eğme testi gerçekleştirilmiştir.

Izod darbe dayanımı testi ISO 180 standardına uygun numuneler ile gerçekleştirilmiştir. Izod darbe testi numunenin çentikli veya çentiksiz olmasına göre farklılık gösterir. Bu çalışmada çentiksiz Izod darbe dayanımı testi yapılmıştır. Test esnasında darbe çekici kullanılmaktadır. Çekiç numuneye çarpacak şekilde serbest bırakılır ve numunenin kırılması sağlanır. Çekiçteki kaybedilen enerji miktarına bakılarak malzemenin darbe esnasında sönmüleyebildiği enerji tespit edilir. Izod darbe dayanımı testi için Instron Ceast 9050 model test cihazı kullanılmıştır. Her kompozisyon için üçer set numune kullanılarak darbe dayanımı testi gerçekleştirilmiştir. Mekanik karakterizasyon tamamlandıktan sonra, kırılan numunelerin kırılma yüzeyleri Tescan Vega 3 taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak incelenmiştir.

III. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde, çalışma esnasında gerçekleştirilen yoğunluk testi, DSC ve termal iletkenlik ölçümleri, üç nokta eğme testi, Izod darbe dayanımı testi ve

mikroskopik gözlemlerle ilgili sonuçlar ve bu sonuçlarla ilgili yorumlar yer almaktadır.

Yoğunluk testi, PA6, PSM, PHS30, PHS35 ve PHGS30 olmak üzere beş adet kompozisyonunda yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar Tablo 2'de verilmiştir. PA6 kodlu kompozisyonun teorik yoğunluğu 1.17 g/cm³ olarak ölçülmüştür. Kütlece %5 SEBS eklenen PSM kodlu kompozisyonunda, SEBS yoğunluğun düşmesine sebep olmuştur. Kütlece %30 ve 35 hBN kullanılan PHS30 ve PHS35 kodlu kompozisyonlarda yoğunlukta artış tespit edilmiştir. Kütlece %2.5 GnP kullanılan PHGS30 kodlu kompozisyonunda ise oran az olduğu için yoğunlukta değişim görülmemiştir. Yoğunluklarda gözlemlenen değişiklikler eklenen takviyelerin yoğunlukları ve kütle oranlarıyla genel olarak orantılıdır. Kompozisyonlara ait yoğunluk değerleri teorik olarak hesaplandığında PA6, PSM, PHS30, PHS35 ve PHGS30 için sırasıyla 1.17, 1.15, 1.49, 1.55 ve 1.52 olarak hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar, teorik sonuçlarla artış ve azalış bakımından paralellik göstermektedir.

Tablo 2. Kompozitlerin camsı geçiş sıcaklıkları

Kompozisyon Adı	Yoğunluk (g/cm ³)
PA6	1.17
PSM	1.12
PHS30	1.25
PHS35	1.27
PHGS30	1.27

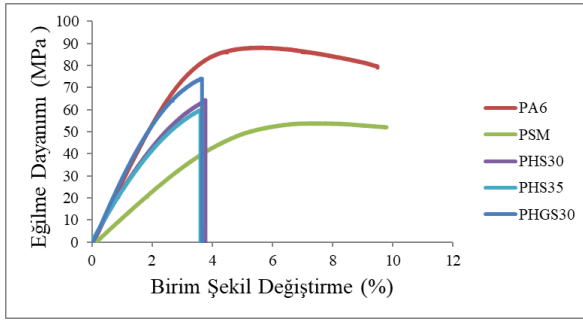
DSC analizi tüm kompozisyonlarda gerçekleştirilmiştir ve DSC eğrileri makaleye ait ek bilgideki Şekil 1,2,3,4 ve 5'te verilmiştir. Elde edilen sonuçlardan bu malzemelerin camsı geçiş sıcaklıkları (T_g) elde edilmiştir. Camsı geçiş, polimerlerde, malzemenin ısınma sonucunda rijit halden kauçuğumsu hale geçtiği durumu ifade eder ve yarı kristal malzemenin amorf fazı içinde meydana gelir. Artan polimer zincir hareketliliği, malzeme özelliklerinde değişikliklere neden olur. Örneğin, sıcaklık değişimine bağlı olarak malzemenin rijitliği azalabilmekte ve termal genişleme katsayısı ve ısı kapasitesi artabilmektedir. Isı kapasitesindeki artış camsı geçiş sıcaklığının tespit edilmesini sağlar. Bu çalışmada DSC ölçümlerinden elde edilen camsı geçiş sıcaklığı değerleri Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. Kompozitlerin camsı geçiş sıcaklıkları

Kompozisyon Adı	Camsı Geçiş Sıcaklığı (°C)
PA6	75.45
PSM	73.37
PHS30	90.55
PHS35	92.03
PHGS30	93.27

DSC sonuçlarına göre, hBN ve GnP takviyesiyle birlikte kompozitlerin camı geçiş sıcaklıklarında artış gözlemlenmiştir. Bu durumun kök nedeni olarak, matriste daha fazla sayıda partikül bulunmasıyla birlikte PA6 zincirlerinin hareketi engellenerek, rijit durumdan kauçuğumsu duruma geçiş gecikir ve böylece T_g 'de bir yükselme gözlemlenir. T_g 'nin yükselme eğilimi, GnP takviyesiyle de devam etmiştir. Bu durum GnP'lerin polimerle yaptığı yüksek arayüzey alanı ile ilintilidir. Çünkü, nanopulcukların kullanılmasıyla beraber artan yüzey alanı kauçuğumsu hale geçişte polimer zincirlerinin hareketini kısıtlar ve bu kısıtın aşılabilmesi için zincirlerin daha yüksek enerjiye sahip olması gerekir. Bu yüksek enerji de sıcaklık artışı (artan T_g) ile birlikte sağlanır [21,22]. SEBS ise PA6'nın T_g 'sini düşürmüştür. Bu durumda SEBS'in düşük T_g 'si ve zincirlerinin yüksek mobilitesi ile ilişkilidir.

Mekanik özelliklerin belirlenmesi için üç nokta eğme testi tüm kompozisyonlar üzerinde gerçekleştirilmiştir. Test sonucunda elde edilen eğilme dayanımı ve birim şekil değiştirme eğrileri Şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 3. Kompozisyonlara ait eğilme dayanımı-birim şekil değiştirme eğrisi

Bu eğriler oluşturulurken her kompozisyon için ortalama değere en yakın olan test sonucu kullanılmıştır. Bu testle malzemelerin eğilme dayanımı, eğilme modülü ve eğilmedeki birim şekil değişimi değerleri de elde edilmiştir ve elde edilen değerler Tablo 4'te verilmiştir.

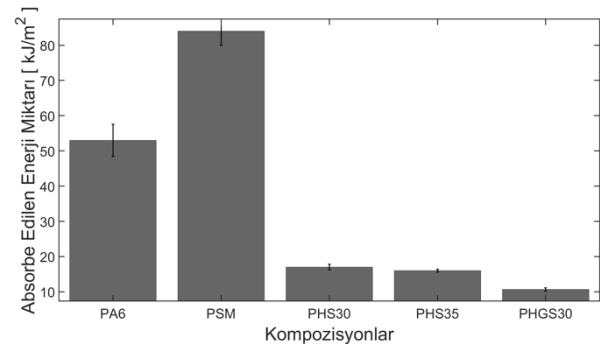
Tablo 4. Üç nokta eğme testi sonuçları

Kompozisyon Adı	Eğilme Dayanımı (MPa)	Eğilme Modülü (MPa)	Eğilmedeki Birim Şekil Değişimi (%)
PA6	88.00±0.3	2749.00 ±35	20.94±0.04
PSM	53.13±1.70	1210.99 ±50.00	24.98±0.12
PHS30	64.83±0.73	2435.41 ±68.96	7.72±0.05
PHS35	59.95±0.17	2418.35 ±56.60	7.37±0.16
PHGS30	74.00±0.60	3789.00 ±60.00	5.53±1.01

SEBS malzemesinin düşük mukavemet ve rijitlik değerlerinin bir sonucu olarak ya da diğer bir deyişle SEBS'in kauçuğumsu tabiatı neticesinde kompozitin eğilme dayanımında %39.6'lık, eğilme modülü değerinde %55.9'luk bir düşüş ve eğilmedeki birim şekilde değiştirme değerinde %19'luk bir artış görülmüştür [17]. Bu düşüşü ikame etmek için, kütlece %30 hBN kullanılması durumunda ise PSM kompozisyonuna göre kompozitin eğilme dayanımı değerinde %22'lik bir artış, eğilme modülünde de %101.1'lik bir artış görülmüş ve öte yandan eğilmedeki birim şekil değiştirme değerinde ise %69'luk bir düşüş görülmüştür.

Teorik olarak, polimerik malzemeler sert inorganik partiküller ile takviye edildiğinde, bu sert malzemeler matris içinde bir omurga görevi görür. İmalat esnasında kullanılan arayüzey takviye ajanlarının da etkisiyle matris ve GnP'ler arasında oluşması muhtemel fiziksel çapraz bağlar aracılığıyla polimerin moleküler zincir hareketi kısıtlanır ve böylece kompozit malzemelerin rijitliği (elastisite modülü) artış gösterir [27]. İnce pulcuk benzeri inorganik partiküller (yani GnP'ler) ile takviye söz konusu olduğunda, GnP'ler yüksek mukavemetleri neticesinde deforme olmadan kalırken matris göreceli deformasyona uğrayacaktır. Sonuç olarak, yüke dik arayüz çekme kuvvetini sürdürürken, yüke paralel arayüz kesme kuvvetini südürecektir. Nano takviyelerin yüksek yüzey alanı sayesinde, iç yapıda birim alan başına düşen kuvvet yani gerilme düşecek ve bu sayede kompozit malzeme kopmadan daha yüksek bir mukavemet gösterecektir [28, 29].

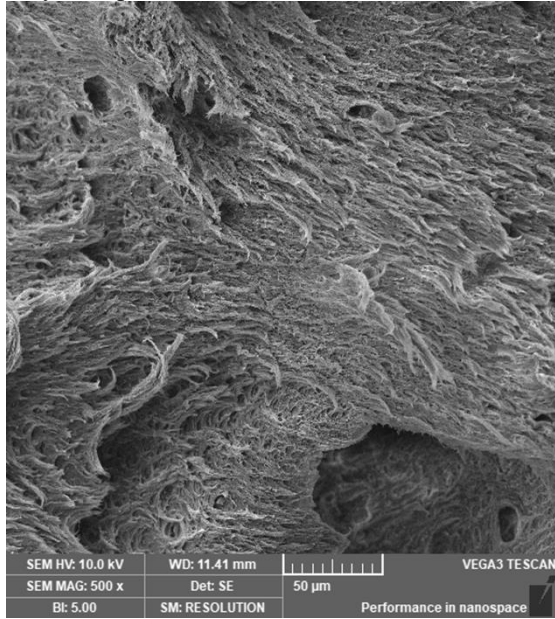
Eğilme dayanımının incelenmesinden sonra, giriş bölümünde de belirtildiği üzere kompozitlerin batarya modülü muhafazasında kullanılması durumunda, muhafazanın aracın alt kısmından, yol tarafından, alabileceği darbelerle karşı dayanımını gözlemlemek için Izod darbe dayanımı testi, tüm kompozisyonlara uygulanmıştır ve elde edilen değerler Şekil 4'te verilmiştir.



Şekil 4. Izod darbe dayanımı testinden elde edilen sonuçlar

Kütlece %5 SEBS kullanılması kompozitin darbe dayanımında %58.5'lik bir artışı beraberinde getirmiştir. SEBS elastomerik bir malzeme olduğu için darbe sönmüleme tabiatına sahiptir ve bu durumda

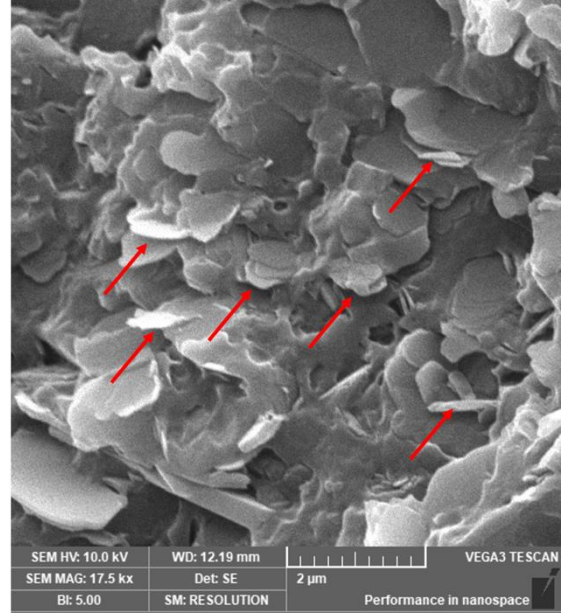
kompozitin absorbe ettiği enerji miktarını olumlu yönde etkilemiştir [16]. Kütlece %30 hBN kullanılması durumunda kompozitin darbe dayanımında %79.8'lik, kütlece %35 hBN kullanıldığı durumda ise %80.9'luk bir azalma görülmüştür. hBN seramik olarak sınıflandırılan bir takviye malzemesidir ve seramikler iç yapılarındaki süreksizlikler nedeniyle gevrek özellik gösterirler [25]. Artan hBN miktarıyla da birlikte kompozitlerin kopma uzamaları önemli ölçüde düşmüş, diğer bir deyişle kompozitler daha gevrek bir karakteristik göstererek darbe sönümleme özelliklerinde düşüş yaşanmıştır. Son olarak, kütlece %2.5 GnP takviyesinin darbe dayanımı üzerine etkilerine eğilecek olursak, GnP takviyesi kompozitin darbe dayanımında ortalama %37.2'lik bir azalmaya sebep olmuştur. Yukarıda deney sonuçlarının yorumlanmasında ortaya konulan hipotezleri desteklemek için SEM ile kırılma yüzeyleri incelemesinde bulunulmuştur. PSM grubu kompozitlerde kopma uzamasının arttığı görülmüştür ve kırılma yüzeyleri de bunu destekler niteliktedir. Şekil 5'te, PSM kompozit grubunun kırılma yüzeyi, düzensiz uzamış bölgelerin yer aldığı pürüzlü bir dokuya sahiptir.



Şekil 5. PSM numunesinin kırılma yüzeyi

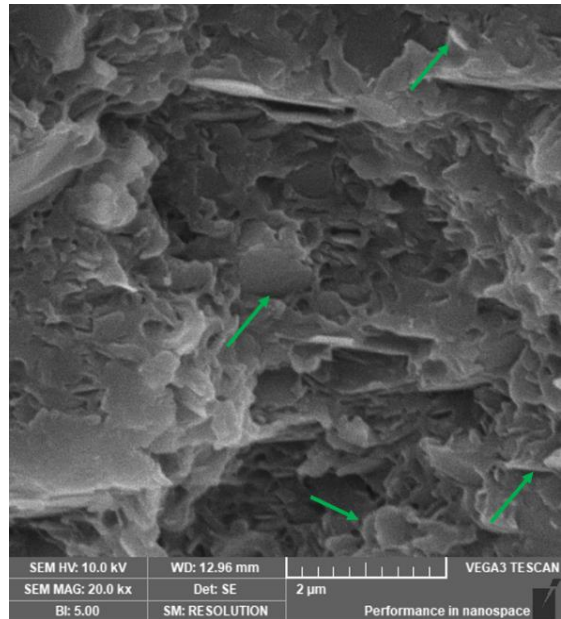
Pürüzlü yüzeyler sünek bir kırılma modunun göstergesidir ve kopma uzamasının arttığına işaret eder. Bununla paralel olarak, kırılma mekaniğinde pürüzlü yüzeyler, artan bir yüzey alanına da işaret eder ve daha fazla yüzey oluşturmak daha fazla yüzey enerjisi gerektirir. Bu enerji, birincil çatlağın yayılması için gerekli olan ve sonunda kırılmaya neden olan birim şekil değişimi enerjisi ile karşılanır. Sonuç olarak, numunenin kırılması ertelenir ve bu da kırılma anındaki gerilmenin artmasına neden olur. Ek olarak, Şekil 5'teki uzun segmentler, daha spesifik olarak uzun kırılma paternleri veya fibriller, lokalize plastik deformasyonunun bir sonucu olarak matris içinde meydana gelen sünek hasarın göstergesidir [31]. Şekil

6'da ise PHS35 numunesine ait bir kırılma yüzeyinin SEM görüntüsü verilmiştir. Bu şekilde kırmızı oklarla ince plaka şeklindeki hBN'ler küçük bir alanda kümelenmiştir. Bu kümelenmeler, gerilme konsantrasyonuna neden olurlar ve bu bölgelerde hBN kümelerinin etrafında mikro çatlaklar oluşabilir. Yük altında, mikro çatlaklar yayılabilir ve bu durum kompozitlerin mukavemetini düşüren erken hasarla sonuçlanabilir.



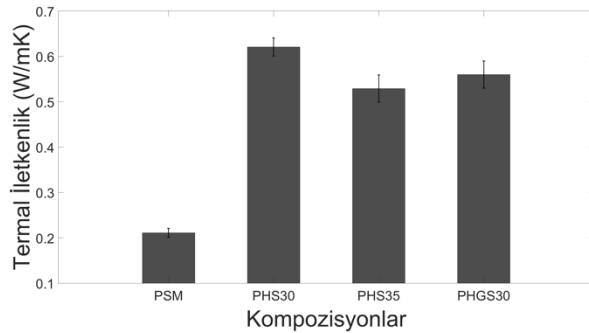
Şekil 6. PHS35 numunesinin kırılma yüzeyi

PHS30 grubu için de gerçekleştirilen benzer büyütme oranlarına sahip SEM görüntüsü Şekil 7'de verilmiştir. Bu görüntüde hBN'ler yeşil oklarla gösterilmiştir, öte yandan bu resimde PHS35 grubunda gözlemlenen küçük bir alana sıkışan birçok hBN'nin varlığına rastlanılmamıştır. Bu durum PHS30 grubunda yoğun bir aglomerasyon olmadığını göstermektedir.



Şekil 7. PHS30 numunesinin kırılma yüzeyi

Mekanik karakterizasyonlardan sonra, hBN ve GnP'lerin termal iletkenlik üzerindeki etkisini belirlemek için termal iletkenlik ölçümleri yapılmıştır ve elde edilen sonuçlar Şekil 8'de verilmiştir. Sonuçlar, %30 hBN eklendiğinde termal iletkenliğin PSM kompozisyonuna göre %194.3 arttığını göstermektedir. Isı akısıyla aynı hızda olan termal kanalların oluşumu, termal iletkenliğin iyileştirilmesinin temel unsurudur. BN plakalarının polimer matris içerisinde rastgele dağıldığı durumda, BN'ler yüksek çap-kalınlık oranına sahip oldukları için termal yol oluşturarak birbirleriyle temasa geçerler. Dikey olarak hizalanan BN plakalarında ise termal temaslar oldukça azalır ve bu durum termal iletkenliği olumsuz etkiler. hBN'nin kütle konsantrasyonu %30'dan %35'e çıktığında termal iletkenlik %15.3 azalmıştır.



Şekil 7. Kompozisyonlara ait termal iletkenlik testi sonuçları

Kalınlık boyunca kümelenmiş BN plakalarının varlığının, ısı iletkenliğinde bir azalmaya yol açtığı varsayılmaktadır. Nanopulcuklardan (1 µm çapında) oluşan ince bir filmin termal iletkenliği, daha büyük parçacıklardan (15 µm çapında) oluşturulan bir filmle karşılaştırıldığında %60.8 daha düşüktür [32]. Bileşimdeki GnP'lerin varlığı, termal iletkenlikte yaklaşık %9.82'lik bir azalmaya yol açmıştır. Bu çalışmada kullanılan GnP'lerin küçük çapları (1.5 µm) göz önüne alındığında, fonon dispersiyonunun neden olduğu temas direnci ve termal iletkenlikte beklenen artışın görülmemesi olasıdır.

Tüm bu deneysel incelemelerden sonra, kompozitlerin mekanik özellikleri mikro mekanik modellerden istifade edilerek hesaplanmıştır. Bu bağlamda, nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin elastik özelliklerinin tahmini için katkı maddesinin geometrisine, oryantasyonuna ve matrisin elastik özelliklerine dayalı çeşitli modeller vardır. Bu modellerden birisi de Halpin-Tsai (HT) modelidir. GnP takviyesi için modifiye edilmiş HT modeli 1, 2, 3, 4, 5 ve 6 numaralı denklemleriyle verilmiştir [33-35].

$$E_C = \frac{3}{8}E_L + \frac{5}{8}E_T \quad (1)$$

$$E_L = E_m \left(\frac{1+\xi\eta_L V_f}{1-\eta_L V_f} \right) \quad (2)$$

$$E_T = E_m \left(\frac{1+2\eta_T V_f}{1-\eta_T V_f} \right) \quad (3)$$

$$\eta_L = \frac{E_f/E_m - 1}{E_f/E_m + \xi} \quad (4)$$

$$\eta_T = \frac{E_f/E_m - 1}{E_f/E_m + 2} \quad (5)$$

$$\xi = \frac{2D_f}{3t_f} \quad (6)$$

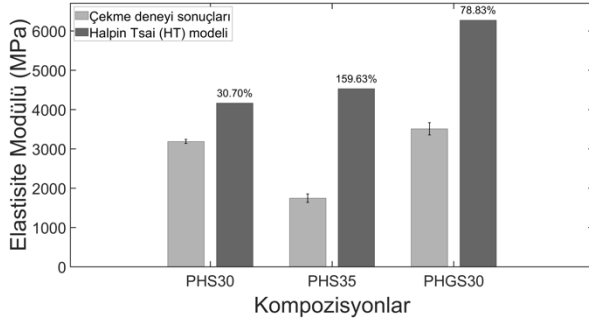
E_c , E_m ve E_f sırasıyla kompozit, matris ve takviye malzemenin elastisite modülüdür. V_f ve ξ ise sırasıyla hacim oranı ve takviye malzemesinin şekil faktörüdür. Yukarıda verilen denklemler ve kompozit kompozisyonları göz önünde bulundurularak, kompozitlere ait elastisite modülü değerleri bulunmuştur. Elastisite modülü hesaplaması yapılırken PSM kompozisyonu için karışımlar kuralından faydalanılmıştır [36]. Geri kalan kompozisyonlar için pulcuk (platelet) şeklindeki takviyeler için geliştirilmiş HT modeli kullanılmıştır. Geliştirilmiş HT modeli için takviyelerin 2 boyutlu ve 3 boyutlu rastgele yönelimini açıklayan iki farklı yaklaşım bulunmaktadır. Daha iyi bir yakınsama sağladığı için 1 numaralı denklemden, 2 boyutlu rastgele yönelimi açıklayan HT modeli kullanılmıştır [35]. Bu denklemden bulunan E_L ve E_T sırasıyla boyuna ve enine elastisite modülünü temsil eder. Bu değerleri hesaplamak için 2 ve 3 numaralı denklemlerden faydalanılmıştır. Pulcuk şeklindeki takviyeler için ξ fonksiyonu 6 numaralı denklemden hesaplanmaktadır [33]. ξ değeri hesaplanırken kullanılan D_f ve t_f sırasıyla takviye malzemenin çap ve kalınlığıdır [37]. PHS30 ve PHS35 kompozisyonuna ait elastisite modülü hesaplanırken, E_m için karışımlar kuralından PSM için elde edilen veriler kullanılmıştır. hBN'ye ait D_{hBN} ve t_{hBN} değerleri Tablo 5'teki gibi alınmıştır.

Tablo 3. Kompozitlerin camısı geçiş sıcaklıkları

Kompozisyon Adı	D_f (nm) (Çap)	t_f (nm) (Kalınlık)
hBN	790	98.75
GnP	1500	3

PHS30 ve PHS35 için hBN miktarları hacimsel oranları değiştirilerek elastisite modülü değerleri hesaplanmıştır. PHGS30 kompozisyonunda E_m olarak HT modelinden PHS30 için elde edilen veriler kullanılmıştır. GnP'ye ait D_{GnP} ve t_{GnP} değerleri Tablo 5'teki gibi alınmıştır. Şekil 9'da HT modeline ait nümerik sonuçlar verilmiş ve nümerik sonuçlar ISO 527 standardına göre gerçekleştirilen çekme deneylerinden elde edilen deneysel modül değerleriyle karşılaştırılmıştır. Çekme testleri, numunelerin 50 mm/dak hızla çekilmesiyle gerçekleştirilmiştir. Çekme testi için Hegewald & Peschke model test cihazı

kullanılmıştır. Her kompozisyon için üçer set numune kullanılarak çekme testleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil 9. Deneysel sonuçlar ile ve HT modeline ait sonuçların karşılaştırılması

Elde edilen sonuçlarda HT modeli kullanılarak elde edilen elastisite modülü değerlerinin, deneysel olarak elde edilen değerlerden daha yüksek olduğu görülmüştür. Bu farkın, HT modelinin, takviyelerin mükemmel şekilde yönlendirilmiş ve eşit şekilde dağıldığı varsayımından kaynaklandığı düşünülmektedir [33]. PHS35 kodlu kompozisyonda ise diğer kompozisyonlara göre önemli bir fark oluşmuştur. Şekil 6'da verilen kümelenmelere bağlı olarak deneysel sonuçlardaki düşüş bu durumu açıklar niteliktedir.

Son olarak da HT modeli, matris takviye arayüzey kalitesini dikkate almamaktadır. Her ne kadar bu çalışmada arayüzey iyileştirici ajanlar kullanılsada oluşması ihtimal dahilinde olan arayüzey problemleri de deneysel sonuçlarla farklılıklara yol açabilmektedir.

IV. SONUÇ

Otomotiv endüstrisinde elektrifikasyonla birlikte köklü bir değişim meydana gelmektedir. Bu değişime destek olacak sonuçların yer aldığı bu çalışma, elektrikli araçların batarya kutularını termoplastik kompozit bir malzeme kullanarak üretip, ağırlığı azaltmayı amaçlamıştır. Çalışmada, kompozitlerin matrisi olarak PA6 kullanılmış, termal iletkenliği artırmak için hBN kullanılmış, termal iletkenliğini ve mekanik özelliklerini iyileştirmek için GnP kullanılmış ve darbe direncini artırmak için SEBS kullanılmıştır. Malzemelerin homojen bir şekilde karıştırılması için çift vidalı ekstrüder kullanılarak ekstrüzyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Üç nokta eğme ve Izod darbe dayanımı testlerinde kullanılmak üzere numune üretimlerinde plastik enjeksiyon yöntemi kullanılmıştır. Elde edilen kompozitlerin yoğunluğu, piyasada sıklıkla batarya kutusu olarak kullanılan alüminyumun yoğunluğuna göre yaklaşık %50 daha düşüktür. Bu sebeple geliştirilen kompozitler hafifletme uygulamalarında kullanılmak üzere önemli bir potansiyel taşımaktadır. Çalışma kapsamında gerçekleştirilen üç nokta eğme testlerine göre, kütlece %30 hBN kullanıldığında eğilme dayanımı ve eğilme modülü sırasıyla %22 ve %101.1 artmaktadır. hBN miktarı kütlece %35'e çıkartıldığında kütlece %30

kullanıldığı duruma göre eğilme dayanımı ve eğilme modülü sırasıyla %7.5 ve %0.7 azalmıştır. Yapılan Izod darbe dayanımı testinde PHGS30 kompozisyonunda darbe dayanımı değerinin düştüğü görülmüştür. %30 hBN eklendiğinde termal iletkenliğin %194.3 arttığı görülmüştür. Sonrasında, Halpin-Tsai mikromekanik modelinden elde edilen veriler, deneysel sonuçlarla karşılaştırılmış ve takviyelerin mükemmel şekilde hizalanıp, eşit olarak dağıldığı durumu modelleyen HT yaklaşımında elastisite modülü değerinin deneysel değerlere göre daha yüksek çıktığı görülmüştür. Bu sonuçlar, kompozitlerin daha ileri imalat yöntemleriyle, örneğin ultrasonik karıştırıcı ekstrüder, imalatıyla daha da iyileştirilebilir potansiyeline sahiptir. Geliştirilen kompozitlerden elde edilen sonuçlar gelecekte yapılacak çalışmalar için oldukça değerlidir ve otomotiv endüstrisinde batarya kutusu imalatında kullanılmak üzere umut vaat etmektedir.

TEŞEKKÜR

Bu akademik çalışma İTÜ Bilimsel Projeler Birimi MYL-2022-44226 kodlu proje kapsamında desteklenmiştir. İmalat esnasında kullanılan ATABOND-1550 malzeme desteği için TMB POLYMER firmasından Mehmet Baskın'a, PA6 desteği için Safic-Alcan firmasından Mustafa Arslan'a teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

- [1] Boden, T., Andres, B., & Marland, G. (1751). Global CO2 Emissions from Fossil-Fuel Burning. Cement manufacture, and gas flaring, 2006, 37831-6335.
- [2] Farzaneh, F., & Jung, S. (2023). Lifecycle carbon footprint comparison between internal combustion engine versus electric transit vehicle: A case study in the US. *Journal of Cleaner Production*, 390, 136111.
- [3] Abnett, K. (2023). EU countries approve 2035 phaseout of CO2-emitting cars. *Reuters*, Mar, 29.
- [4] Anadolu Ajansı. (2023). Türkiye'nin ilk batarya fabrikasının inşasına Bursa'da başlanacak <https://www.aa.com.tr/tr/bilim-teknoloji/turkiyenin-ilk-batarya-fabrikasinin-insasina-bursada-baslanacak/2879229>
- [5] Wang, Z., Zhang, K., Zhang, B., Tong, Z., Mao, S., Bai, H., & Lu, Y. (2022). Ultrafast battery heat dissipation enabled by highly ordered and interconnected hexagonal boron nitride thermal conductive composites. *Green Energy & Environment*, 7(6), 1401-1410.
- [6] Börner, M., Friesen, A., Grütze, M., Stenzel, Y. P., Brunklaus, G., Haetge, J., ... & Winter, M. (2017). Correlation of aging and thermal stability of commercial 18650-type lithium ion batteries. *Journal of power sources*, 342, 382-392.
- [7] Bala, A., & Chaitanya Kamaraju, M. (2020). Design and optimization of battery housing in electric cars.

- [8] Li, C., Zhang, H., Zhang, X., Zhang, Z., Li, N., Liu, Y., ... & Sun, J. (2022). Construction of bi-continuous structure in fPC/ABS-hBN (GB) composites with simultaneous enhanced thermal conductivity and mechanical properties. *Composites Science and Technology*, 223, 109437.
- [9] Gu, J., Meng, X., Tang, Y., Li, Y., Zhuang, Q., & Kong, J. (2017). Hexagonal boron nitride/polymethyl-vinyl siloxane rubber dielectric thermally conductive composites with ideal thermal stabilities. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 92, 27-32.
- [10] Nazir, M. T., Phung, B. T., Hoffman, M., Yu, S., & Li, S. (2017). Micro-AlN/nano-SiO₂ co-filled silicone rubber composites with high thermal stability and excellent dielectric properties. *Materials Letters*, 209, 421-424.
- [11] Zhang, Y., & Park, S. J. (2018). In situ shear-induced mercapto group-activated graphite nanoplatelets for fabricating mechanically strong and thermally conductive elastomer composites for thermal management applications. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 112, 40-48.
- [12] Dai, P., Jiao, Y., Ma, H., Zeng, X., Lu, Y., Wang, L., ... & Zhai, M. (2019). Radiation synthesis of polysilane-modified graphene oxide for improving thermal conductivity and mechanical properties of silicone rubber. *Journal of Applied Polymer Science*, 136(29), 47776.
- [13] Temel, U. N. (2019). Passive thermal management of a simulated battery pack at different climate conditions. *Applied Thermal Engineering*, 158, 113796.
- [14] Li, C., Zhang, H., Zhang, X., Zhang, Z., Li, N., Liu, Y., ... & Sun, J. (2022). Construction of bi-continuous structure in fPC/ABS-hBN (GB) composites with simultaneous enhanced thermal conductivity and mechanical properties. *Composites Science and Technology*, 223, 109437.
- [15] Yuan, C., Li, J., Lindsay, L., Cherns, D., Pomeroy, J. W., Liu, S., ... & Kuball, M. (2019). Modulating the thermal conductivity in hexagonal boron nitride via controlled boron isotope concentration. *Communications physics*, 2(1), 43.
- [16] Gong, Y., Zhou, W., Kou, Y., Xu, L., Wu, H., & Zhao, W. (2017). Heat conductive h-BN/CTPB/epoxy with enhanced dielectric properties for potential high-voltage applications. *High Voltage*, 2(3), 172-178.
- [17] Okan, C., Kaya, R., Irez, A. B., & Cebe, E. (2022). 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: Proceedings of the 2021 Annual Conference on Experimental and Applied Mechanics* (pp. 23-28). Springer International Publishing.
- [18] Gao, X., Qu, C., & Fu, Q. (2004). Toughening mechanism in polyoxymethylene/thermoplastic polyurethane blends. *Polymer international*, 53(11), 1666-1671.
- [19] Irez, A. B., Okan, C., Kaya, R., & Cebe, E. (2022). Development of recycled disposable mask based polypropylene matrix composites: Microwave self-healing via graphene nanoplatelets. *Sustainable Materials and Technologies*, 31, e00389.
- [20] Seyhan, A., Irez, A. B., & Polat, Y. (2022, June). Development of a Polyamide 6-Based Composite Material for UAV Propellers. In *Society for Experimental Mechanics Annual Conference and Exposition* (pp. 73-77). Cham: Springer International Publishing.
- [21] Cui, Shaoying, Pingfu Wei, and Li Li. "Preparation of poly (propylene carbonate)/graphite nanoplates-spherical nanocrystal cellulose composite with improved glass transition temperature and electrical conductivity." *Composites science and technology* 168 (2018): 63-73.
- [22] Ma, J., Meng, Q., Zaman, I., Zhu, S., Michelmore, A., Kawashima, N., ... & Kuan, H. C. (2014). Development of polymer composites using modified, high-structural integrity graphene platelets. *Composites Science and Technology*, 91, 82-90.
- [23] Rasul, M. G., Kiziltas, A., Arfaei, B., & Shahbazian-Yassar, R. (2021). 2D boron nitride nanosheets for polymer composite materials. *npj 2D Materials and Applications*, 5(1), 56.
- [24] Madarvoni, Srivatsava, and Rama PS Sreekanth. "Mechanical characterization of graphene—hexagonal boron Nitride-Based kevlar—carbon hybrid fabric nanocomposites." *Polymers* 14.13 (2022): 2559.
- [25] Gul, S., Arican, S., Cansever, M., Beylergil, B., Yildiz, M., & Saner Okan, B. (2022). Design of highly thermally conductive hexagonal boron nitride-reinforced PEEK composites with tailored heat conduction through-plane and rheological behaviors by a scalable extrusion. *ACS Applied Polymer Materials*, 5(1), 329-341.
- [26] Saha, M., Tambe, P., Pal, S., Kubade, P., Manivasagam, G., Anthony Xavier, M., & Umashankar, V. (2015). Effect of non-ionic surfactant assisted modification of hexagonal boron nitride nanoplatelets on the mechanical and thermal properties of epoxy nanocomposites. *Composite Interfaces*, 22(7), 611-627.
- [27] Bilisik, K., & Akter, M. (2022). Polymer nanocomposites based on graphite nanoplatelets (GNPs): a review on thermal-electrical conductivity, mechanical and barrier properties. *Journal of Materials Science*, 57(15), 7425-7480.

- [28] Inuwa, I. M., Hassan, A., Samsudin, S. A., Mohamad Kassim, M. H., & Jawaid, M. (2014). Mechanical and thermal properties of exfoliated graphite nanoplatelets reinforced polyethylene terephthalate/polypropylene composites. *Polymer Composites*, 35(10), 2029-2035.
- [29] Irez, A. B., Miskioglu, I., & Bayraktar, E. (2018). Mechanical characterization of epoxy–scrap rubber based composites reinforced with nano graphene. In *Mechanics of Composite and Multi-functional Materials, Volume 6: Proceedings of the 2017 Annual Conference on Experimental and Applied Mechanics* (pp. 45-57). Springer International Publishing.
- [30] Gao, Y., Picot, O. T., Bilotti, E., & Peijs, T. (2017). Influence of filler size on the properties of poly (lactic acid)(PLA)/graphene nanoplatelet (GNP) nanocomposites. *European Polymer Journal*, 86, 117-131.
- [31] Nakhaei MR, Naderi G, Ghoreishy MHR. Fracture mechanisms and failure analysis of PA6/NBR/graphene nanocomposites by essential work of fracture. *Iran Polym J (English Ed)*. 2021;30(9):975-987. doi:10.1007/s13726-021-00950-9
- [32] Xiang, J., & Drzal, L. T. (2011). Thermal conductivity of exfoliated graphite nanoplatelet paper. *Carbon*, 49(3), 773-778.
- [33] Kalaitzidou, K., Fukushima, H., Miyagawa, H., & Drzal, L. T. (2007). Flexural and tensile moduli of polypropylene nanocomposites and comparison of experimental data to Halpin-Tsai and Tandon-Weng models. *Polymer Engineering & Science*, 47(11), 1796-1803.
- [34] Irez, A. B., & Ramazan, K. A. Y. A. (2022). Geri Dönüştürülmüş PP Bazlı Nano Grafen Takviyeli Hibrit Kompozitlerin Geliştirilmesi ve Mekanik Özelliklerinin Mikromekanik Yöntemler ile Belirlenmesi. *International Journal of Advances in Engineering and Pure Sciences*, 34(4), 569-579.
- [35] King, J. A., Klimek, D. R., Miskioglu, I., & Odegard, G. M. (2013). Mechanical properties of graphene nanoplatelet/epoxy composites. *Journal of applied polymer science*, 128(6), 4217-4223.
- [36] Mokoena, T. E., Magagula, S. I., Mochane, M. J., & Mokhena, T. C. (2021). Mechanical properties, thermal conductivity, and modeling of boron nitride-based polymer composites: A review. *Express Polymer Letters*, 15(12), 1148-1173.
- [37] Ahmadi-Moghadam, B., & Taheri, F. (2014). Effect of processing parameters on the structure and multi-functional performance of epoxy/GNP-nanocomposites. *Journal of materials science*, 49, 6180-619.