



EFFECT OF BONE ASH AND COMPATIBILIZER ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF PP/PA6 MATRIX COMPOSITES

Lemiye Atabek Savaş^{*1}, Yusuf Uzunoğlu², Soner Savaş¹

¹Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Bölümü, Kayseri, Türkiye

²Millî Savunma Bakanlığı, 2'nci Ana Bakım Fabrika Müdürlüğü, Kayseri, Türkiye

Abstract

Original scientific paper

In this study, the effects of bone ash and maleic anhydride grafted polypropylene (MAPP) additives used in polypropylene (PP)/polyamide 6 (PA6) blends on the mechanical and tribological properties of the composites were investigated. Bone powder is a waste material especially in food industry. The use of bone powder in polymer matrix composites is important because of the reduction of petroleum-based content in the composites and its biodegradable characteristic. The composites were produced using a twin-screw extruder by melt blending method and then molded to sample sizes to be used in mechanical and tribological tests by injection molding. Tensile test, three-point bending test, Shore D hardness test and ball-on-disc sliding wear tests were carried out on the composites and the results were compared with respect to the composite composition. When the results were examined, it was found that the bone ash additive was more effective on the hardness and the compatibilizer additive was more effective on the tensile and bending strength. The highest hardness values were achieved with 20% and 30% bone ash additives. It has been found that bone ash is also very effective in reducing the friction coefficients, especially when used with compatibilizer it reduces the wear rates significantly (up to 98%). In summary, PP/PA6 matrix composites obtained with the synergistic effect of bone ash and MAPP are promising for applications requiring mechanical and wear resistance.

Keywords: Bone ash, maleic anhydride, mechanical properties, polyamide 6, polypropylene.

KEMİK KÜLÜ VE UYUMLAŞTIRICININ PP/PA6 MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİ ÜZERİNE ETKİSİ

Özet

Orijinal bilimsel makale

Bu çalışmada, polipropilen (PP)/poliamid 6 (PA6) karışımlarında kullanılan kemik külü ve uyumlaştırıcı olarak maleik anhidrit aşıllı polipropilen (MAPP) katkısının kompozitlerin mekanik ve tribolojik özellikleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Kemik tozu özellikle gıda sektöründe atık bir malzeme olarak karşımıza çıkmaktadır. Kemik külünün polimer matris içinde kullanımı, petrol bazlı içeriğin azaltılması ve biyo-bozunurluk özelliği sunmasından dolayı önem arz etmektedir. Kompozitler ergiyik harmanlama yöntemi ile bir çift vidalı ekstrüder makinesi kullanılarak üretilmişlerdir ve ardından enjeksiyon kalıplama ile mekanik ve tribolojik testlerde kullanılacak numuneler şeklinde kalıplanmışlardır. Kompozitlere çekme testi, üç-nokta eğme testi, Shore D sertlik testi ve ball-on-disk kayma aşınma testleri uygulanmış ve sonuçlar kompozit bileşimine göre karşılaştırılmıştır. Sonuçlar incelendiğinde, kemik külü katkısının sertlik üzerinde, uyumlaştırıcı katkısının ise çekme ve eğme mukavemeti üzerinde daha etkili olduğu bulunmuştur. %20 ve %30 kemik külü katkısında en yüksek sertlik değerlerine ulaşılmıştır. Kemik külünün sürtünme katsayılarını düşürmede de çok etkili olduğu, özellikle uyumlaştırıcı ile birlikte kullanıldığında aşınma miktarını önemli miktarda (%98'e kadar) azalttığı bulunmuştur. Özetle, kemik külü ve MAPP sinerjik etkisi ile elde edilen PP/PA6 matrisli kompozitler mekanik ve aşınma direnci gerektiren uygulamalar için ümit vadetmektedir.

Anahtar Kelimeler: Kemik külü, maleik anhidrit, mekanik özellikler, poliamid 6, polipropilen.

1 Giriş

Mühendislik plastiklerinin özellikle bitki ve hayvanlardan elde edilen doğal takviye malzemeleri ile güçlendirilmesi özellikle son yıllarda önemi artan bir araştırma konusudur. Bu tür kompozitlerin düşük

maliyetlerde üretilebilmesi, çevreci ve biyo-bozunur olmaları, ayrıca sentetik takviyeli rakipleri ile kıyaslanabilir mekanik ve fiziksel özellikler sunabilmeleri önemli avantajlarından [1-3]. Polipropilen (PP) bir çeşit poliolefin olup, her bir zincir birimine bağlı bir metil grubu (-H₂C-CRH-)n vardır. PP, kimyasal ve boyutsal

* Corresponding author.

E-mail address: atabekl@erciyes.edu.tr (L. Atabek Savaş)

Received 29 January 2022; Received in revised form 06 April 2022; Accepted 17 April 2022

2587-1943 | © 2022 IJIEA. All rights reserved.

Doi: <https://doi.org/10.46460/ijiea.1065103>

kararlılık, uygun maliyet, yüksek aşınma ve alev direnci gibi özelliklerinden dolayı özellikle otomotiv, inşaat, biyomedikal, spor, vb. endüstriyel uygulamalarda doğal takviye malzemeleriyle birlikte matris malzemesi olarak yaygın kullanılan bir polimerdir [4,5]. Poliamid 6 (PA6) ise yüksek sertlik ve mekanik dayanım özellikleri ile öne çıkan bir mühendislik plastiğidir. PP/PA6 karışımları, PP'nin kolay işlenebilmesi, neme dayanıklı oluşu, PA6'nın ise sağladığı termomekanik ve oksijen bariyeri özellikleri sebebiyle son yıllarda önem kazanmış bir malzeme olup, özellikle ambalaj ve otomotiv sanayi parçalarında kullanım alanı bulmaktadır [6]. Ayrıca farklı özellikler kazandırmak amacıyla PP/PA6 karışımları karbon nanotüp [7], karbon fiber [8], doğal talk [9] ve organo-kil (nano-kil) [10-13] gibi takviye elemanları ile birlikte de kullanılabilir. Benzer çalışmalarda ara yüzey bağ direncini iyileştirmek için uyumlaştırıcı kullanımı dikkat çekmektedir.

Literatürde karbonize edilmiş (kül) ve edilmemiş (partikül) formlarda kemik tozunun takviye malzemesi olarak kullanıldığı çeşitli çalışmalar mevcuttur [14-17]. Asuke ve ark. [18] yaptıkları çalışmada, her iki formda kemik tozunu PP matris içerisinde kullanmışlar ve karbonize edilen kemik tozu ile daha yüksek mekanik özelliklere ulaşmışlardır. %25 (ağırlıkça – ağı.) kemik tozu takviyesinde en yüksek mekanik özellikleri (sertlik, çekme ve eğme mukavemeti) yakalamışlar ve bunun sert partikül yapısının sünek PP matrisin özelliklerini iyileştirmesine dayandırmışlardır. Vignesh ve ark. [19] çalışmalarında hindistan cevizi lifi ve kemik tozunu belirli oranlarda polyester matrisle karıştırmışlar ve mekanik özellikler üzerine farklı parametrelerin etkilerini Taguchi yöntemi ile incelemişlerdir. Sonuç olarak, kullandıkları en yüksek değerler olan %20 (ağı.) toz içeriğinde ve 120 µm partikül boyutunda mekanik özelliklerin en üst düzeye ulaştığını tespit etmişlerdir. Oladele ve ark [20,21], polyester matris kullandıkları çalışmalarında, %8 (ağı.) kemik tozu takviyesinin çekme mukavemetinde, %8 (ağı.) kemik külü takviyesinin ise eğme mukavemetinde olumlu sonuçlar verdiğini tespit etmişlerdir. Polyester matrisin kullanıldığı bir başka çalışmada ise 106 µm partikül boyutuna sahip %6 (ağı.) kemik külü ile en yüksek sertlik değerine (87.8 HV) ulaşılmıştır [22]. Oladele ve ark. [23] bir başka çalışmalarında epoksi matrisi kullanmışlar ve kemik tozunu 400 °C'de ısıtılarak tabi tutarak içerdiği proteini ortadan kaldırmışlardır. %16 (ağı.) toz içeriğinde optimum mekanik ve aşınma direnci özelliklerine ulaşmışlardır. Biyo-esaslı epoksi reçine ile yapılan bir başka çalışmada [24], %2 (ağı.) nano boyutlara indirgenmiş kemik külü ilavesi ile eğme mukavemeti ve modülünde sırasıyla %41,25 ve %34,56'lık artış elde edilmiştir. Krithiga ve ark. [25] kemik külü/yumurta kabuğu tozu/jelatin karışımı ile elde ettikleri kompozitlerde kemik külü (3 g), yumurta kabuğu (7 g) stokiometrik oranında en iyi mekanik özelliklere ulaşmışlardır. Ayrıca öğütülmüş balık kılıcı (0,15-0,42 µm) ile de PP matrisli kompozitlerin çekme, eğme ve darbe mukavemeti özelliklerinde iyileşmeler gözlenmiştir [26].

PP/PA6 karışımları ve kemik külü (HAP) (%ağı. 5-10-20-30) takviyeli kompozitler ergiyik harmanlama yöntemi ile üretilmiş olup, karışma verimini dolayısıyla mekanik ve aşınma direnci özelliklerini geliştirmek amacıyla MAPP kopolimeri kullanılmıştır. MAPP'ın özelliği yüzeydeki hidroksil (-OH) grupları ile reaksiyona girerek kovalent

veya hidrojen bağları oluşturmak, bu sayede takviye ile matris malzemeleri arasındaki bağ mukavemetini arttırmaktır. PP ile PA6 arasındaki bağın ve ayrıca mekanik özelliklerin de MAPP ile geliştiği birçok çalışmayla kanıtlanmıştır [27-30]. MAPP, PA6'nın amin uç grupları ile ergiyik harmanlama prosesi esnasında reaksiyona girebilmektedir [6]. Kompozitler için de benzer sonuçlara ulaşılmıştır. Literatürde ayrıca, maleik anhidrit aşıllı stiren-etilen-bütülen-stiren blok kopolimeri (SEBS-g-MAH) ve maleik anhidrit aşıllı polietilen-okten elastomeri (POE-g-MA) gibi farklı uyumlaştırıcılar ile de yüksek mekanik özellikler elde edilmiştir [29,31]. Gerekli MAPP miktarını belirlemek için literatürde farklı yaklaşımlar bulunmaktadır. Kopolimer miktarı tüm bileşimler için sabit tutulabilmesine rağmen, kopolimer ve takviye fazı arasındaki oran, gerekli uyumlaştırıcı miktarını belirlemek için önerilen diğer bir yöntemdir [32]. Bu çalışmada kullanılan her bir ağırlıkça kemik külü konsantrasyonunun %5'i kadar uyumlaştırıcı kullanımı tercih edilmiştir (%0,25-1,5 aralığında). Enjeksiyon kalıplamanın ardından numunelere çekme testi, üç-nokta eğme testi, Shore D sertlik testi ve ball-on-disk kayma aşınma testleri uygulanmış, sonuçlar konsantrasyona göre değerlendirilmiş, ayrıca aşınma mekanizmaları optik mikroskop görüntüleri ile yorumlanmıştır. Literatür incelendiğinde, PP/PA6 karışımlarına kemik külü takviyesi ile elde edilen kompozitlerin mekanik ve tribolojik özelliklerinin incelendiği herhangi bir çalışmaya rastlanılmamış olup, çalışmadan elde edilecek sonuçların farklı kullanım alanlarına ışık tutması hedeflenmiştir. Ayrıca bir atık malzeme olan kemiğin kompozit yapıda değerlendirilebilecek olması hem çevresel hem de ekonomik açıdan önem arz etmektedir.

2 Malzeme ve Metot

2.1 Kullanılan Malzemeler

Polipropilen (PP), pelet formda Hellenic Petroleum (Yunanistan) şirketinden temin edilmiştir. PP, 12 g/10 dak (230 °C/2,16 kg yükte, ASTM D1238) ergiyik akış hızına, 0,90 g/cm³ yoğunluğa (ASTM D792) ve 122 °C ergime sıcaklığına (DSC) sahiptir. Kullanılan poliamid 6 (PA6), 35 g/10 dak (230 °C/2,16 kg yükte, ASTM D1238) ergiyik akış hızına 1,14 g/cm³ yoğunluğa (ASTM D1505) ve 220°C ergime sıcaklığına sahip olup Emaş Plastik (Türkiye)'den alınmıştır. Maleik anhidrit aşıllı polipropilen (MAPP) kopolimeri Sigma-Aldrich Co. (USA) şirketinden satın alınmıştır. MAPP, %ağı. 8-10 maleik anhidrit içeriğine, 0,93 g/cm³ yoğunluğa ve 156 °C'lik bir ergime sıcaklığına sahiptir. Kemik tozu yerel bir firmadan temin edilen sığır kemiklerinin Herzog HSM 100H (Almanya) marka bir değirmende 60 sn boyunca öğütülmesiyle elde edilmiş olup, öncesinde ilik, kıkırdak, yağ gibi yumuşak doku bir bıçak yardımıyla temizlenmiştir. Tozlar, 200 °C'de 1 saat süre ile elektrikli fırında ön kalsinasyona tabi tutularak organik yapının uzaklaşması sağlanmıştır. Ardından 4 saat boyunca 900 °C'de tutularak istenilen apatit yapılı kemik külü haline getirilmiş, 140 µm elekten geçirilmiş ve karışım öncesine kadar plastik poşetlerde saklanmıştır.

2.2 Kompozitlerin Üretimi

PA6/PP karışımları ve PA6/PP/HAP/MA kompozitleri $D=12$ mm vida çaplı ve 24 uzunluk/çap (L/D) oranlı, vidaları aynı yönde dönmeyen çift vidalı bir ekstrüder (Gülner, Türkiye) ile ergiyik harmanlama tekniği ile üretilmiştir. Bileşim oranları Tablo 1’de verilmiştir. PA6’nın mekanik özellikler üzerindeki etkisi daha fazla olduğundan HAP ve MAPP’ın kullanıldığı bileşimlerde PA6 %80 (ağ.) oranında kullanılmıştır. Karıştırılmadan önce PP ve PA6 peletleri ile diğer malzemeler 24 saat 80 °C’deki bir etüvde önceden kurutulmuştur. Ekstrüderin altı bölgesinin sıcaklık profili besleme bölgesinden ısıtma bölgelerine

doğru sırasıyla 35, 205, 215, 225, 215 ve 210 °C’de ayarlanmıştır. Ekstrüze edilen malzeme çubuk formunda kalıptan çıkarılmış, bir fan yardımıyla katılaştırıldıktan sonra bir granülatör kullanılarak pelet haline getirilmiştir. Ardından 80 °C’de bir etüvde tekrar 12 saat kurutulmuştur. Daha sonra peletler 12 ml’lik bir mikro enjeksiyon kalıplama cihazı (Xplore IM 12, Hollanda) kullanılarak çekme, eğme ve aşınma testi için gereken standart numune şekillerine kalıplanmıştır. Enjeksiyon cihazının kovan ve kalıp sıcaklıkları sırasıyla 210 ve 25 °C, enjeksiyon basıncı 7 bar seçilmiştir. Saf PP ve PA6 kontrol numuneleri de aynı şartlardan geçirilerek üretilmiştir.

Tablo 1. Numunelerin kimyasal bileşimi.

Numune Kodu	PA6 (ağ.%)	PP (ağ.%)	HAP (ağ.%)	MA (ağ.%)
Saf PA6	100	0	0	0
Saf PP	0	100	0	0
80PA6/20PP	80	20	0	0
50PA6/50PP	50	50	0	0
20PA6/80PP	20	80	0	0
80PA6/20PP-5HAP	80	20	5	0
80PA6/20PP-10HAP	80	20	10	0
80PA6/20PP-20HAP	80	20	20	0
80PA6/20PP-30HAP	80	20	30	0
80PA6/20PP-5HAP-0,25 MA	80	20	5	0,25
80PA6/20PP-10HAP-0,5 MA	80	20	10	0,50
80PA6/20PP-20HAP-1 MA	80	20	20	1,0
80PA6/20PP-30HAP-1,5 MA	80	20	30	1,5
80PA6/20PP-0,25 MA	80	20	0	0,25
80PA6/20PP-0,5 MA	80	20	0	0,50
80PA6/20PP-1 MA	80	20	0	1,0
80PA6/20PP-1,5 MA	80	20	0	1,5

2.3 Mekanik Testler

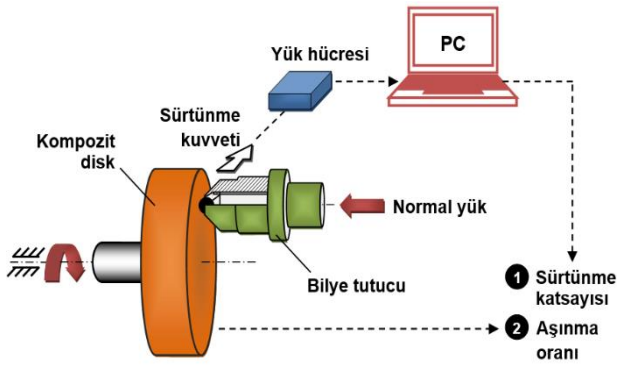
Numunelere mekanik test olarak çekme, 3-nokta eğme ve sertlik testleri uygulanmıştır. Çekme testleri ASTM D638 standardına uygun şekilde tip-V numune ölçüleri kullanılarak, 5 kN yüklem kapasiteli bir çekme-basma test cihazında (Devotrans GP/R/DNN/CKS III, Türkiye) gerçekleştirilmiştir. Çekme hızı 5 mm/dak olarak ayarlanmıştır. 3-nokta eğme testleri ASTM D790 standardına uygun olarak yapılmış ve aynı cihaz basma modunda kullanılmıştır. Kullanılan dikdörtgen kesitli numune ölçüleri 12.7 mm x 125 mm x 3.2 mm olup, mesnetler arası mesafe 55 mm olacak şekilde ayarlanmıştır. Eğme hızı tüm testler için 1 mm/dak olarak seçilmiştir. Testler 25 ± 2 °C’lik sıcaklıkta gerçekleştirilmiş olup en az 3 ölçümün ortalaması alınarak sonuçlar grafik halinde sunulmuştur. Kompozit sertlikleri dijital bir Shore D sertlik ölçüm cihazı (Bareiss HPE II, Almanya) kullanılarak ASTM D2240 standardına uygun şekilde ölçülmüştür. Numunelerin farklı bölgelerinden 12 ölçüm alınarak ortalamaları alınmış ve bileşime göre değişimleri grafik halinde verilmiştir.

2.4 Aşınma Testleri

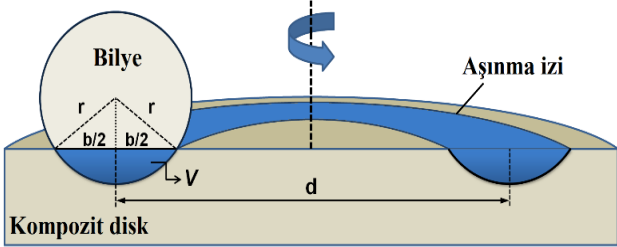
Aşınma testleri özel üretim bir ball-on-disk aşınma test cihazı kullanılarak kuru kayma şartlarında ASTM G99

standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Şekil 1’de görüldüğü gibi test numunelerinin yüzeyleri yere dik olarak konumlandırılmış ve yüklem ise yere paralel olarak gerçekleştirilmiştir. Bu şekilde aşınma ürünlerinin aşınma yolu üzerinde kalmaması ve üçüncü eleman olarak abrazyon etkide bulunmasının azaltılması amaçlanmıştır. Benzer şekilde çalışan aşınma test sistemlerine literatürde rastlamak mümkündür. 30 mm çap ve 8 mm kalınlığa sahip silindirik şeklindeki test numuneleri enjeksiyon kalıplama ile üretilmiştir. Numunelerin aşınma testine tabi tutulacak yüzeyleri $R_a \approx 0,20$ µm pürüzlülüğe ulaşıncaya kadar su zımparasında kademeli olarak parlatılmıştır. Çalışmada yüksek sertlik ve kimyasal kararlılık avantajlarından dolayı 05 mm silisyum nitrür (Si_3N_4) bilyeler aşındırıcı olarak kullanılmıştır. Bilyeler, Şekil 1’de görüldüğü gibi bir tutucuya bağlanmış ve temas esnasında dönmeleri engellenmiştir. Bu şekilde kayma sürtünmesi elde edilebilmiştir. Tutucuya dik olarak bağlanan bir yük ölçer ile sürtünme kuvvetleri anlık olarak kaydedilmiş ve kararlı hal sürtünme rejimi içerisindeki sürtünme kuvvetlerinin ortalaması alınarak ve bu değer uygulanan dik kuvvete bölünerek her bir numune için sürtünme katsayısı değerleri hesaplanmıştır. Testlerde kullanılan dik yük 5 N ve kompozit disklerin dönüş hızı 1100 dev/dak olarak seçilmiştir. Dönüş hızı kayma yolu içerisinde yaklaşık olarak 0,7 m/s kayma hızına karşılık gelmektedir. Aşınma testleri yaklaşık 420 m kayma mesafesinde sonlandırılmış

olup bu mesafe her bir numune için 10 dak'lık test süresinde elde edilmiştir. Numunelerin aşınma yolu iz merkezleri dikkate alınarak hesaplanan ortalama aşınma izi çapı yaklaşık olarak 12 mm'dir. Aşınma testleri 25 ± 2 °C'lik sıcaklığa sahip atmosferde ve yaklaşık %25-30 nemli ortamda tamamlanmıştır. Testlerden önce numune ve bilye yüzeyleri alkolle silinmiş ve dikkatlice kurutulmuştur. Aşınma test geometrisi şematik olarak Şekil 2'de görüldüğü gibidir. Burada, V (mm^3) aşınma hacmi, K ($\text{mm}^3 \text{N}^{-1} \text{m}^{-1}$) aşınma oranı olup, formül (1) ve (2)'den hesaplanmaktadır. Formüllerdeki, b ve d sırasıyla aşınma iz genişliği ve çapı (mm), r Si_3N_4 bilyenin yarı çapı (mm), F dik kuvvet (N) ve S bilyenin kayma mesafesi (m)'dir. Ortalama aşınma iz genişlikleri "trapezoidal area model" ile hesaplanmış olup detaylarına [33] no'lu referanstan ulaşılabilir. Aşınma testlerinin ardından numune yüzeyleri optik mikroskop ile incelenmiş ve aşınma mekanizmaları bileşime göre yorumlanmıştır.



Şekil 1. Ball-on-disk aşınma test düzeneği.



Şekil 2. Aşınma test geometrisinin şematik gösterimi.

$$V = \left[\frac{\pi r^2}{180} \arcsin\left(\frac{b}{2r}\right) - \frac{b}{2} \sqrt{r^2 - \frac{b^2}{4}} \right] \pi d \quad (1)$$

$$K = \frac{V}{FS} \quad (2)$$

3 Bulgular ve Değerlendirme

3.1 Mekanik Test Sonuçları

Şekil 3a ve b'de 80PA6/20PP-30HAP-1,5 MA, Şekil 3c ve d'de ise 80PA6/20PP-30HAP numunelerine ait sıvı azotta bekletilip kırıldıktan sonra elde edilen kırık yüzey SEM fotoğrafları görülmektedir. Uyumlaştırıcı kullanılan numunede partikül dağılımının nispeten daha homojen olduğu dikkat çekmektedir. Uyumlaştırıcı kullanılmayan numunede ise partikül boyutunun koagülasyondan dolayı daha büyük olduğu, ayrıca pembe ve sarı oklarla gösterildiği gibi partikül/matris ara yüzeyinde yetersiz

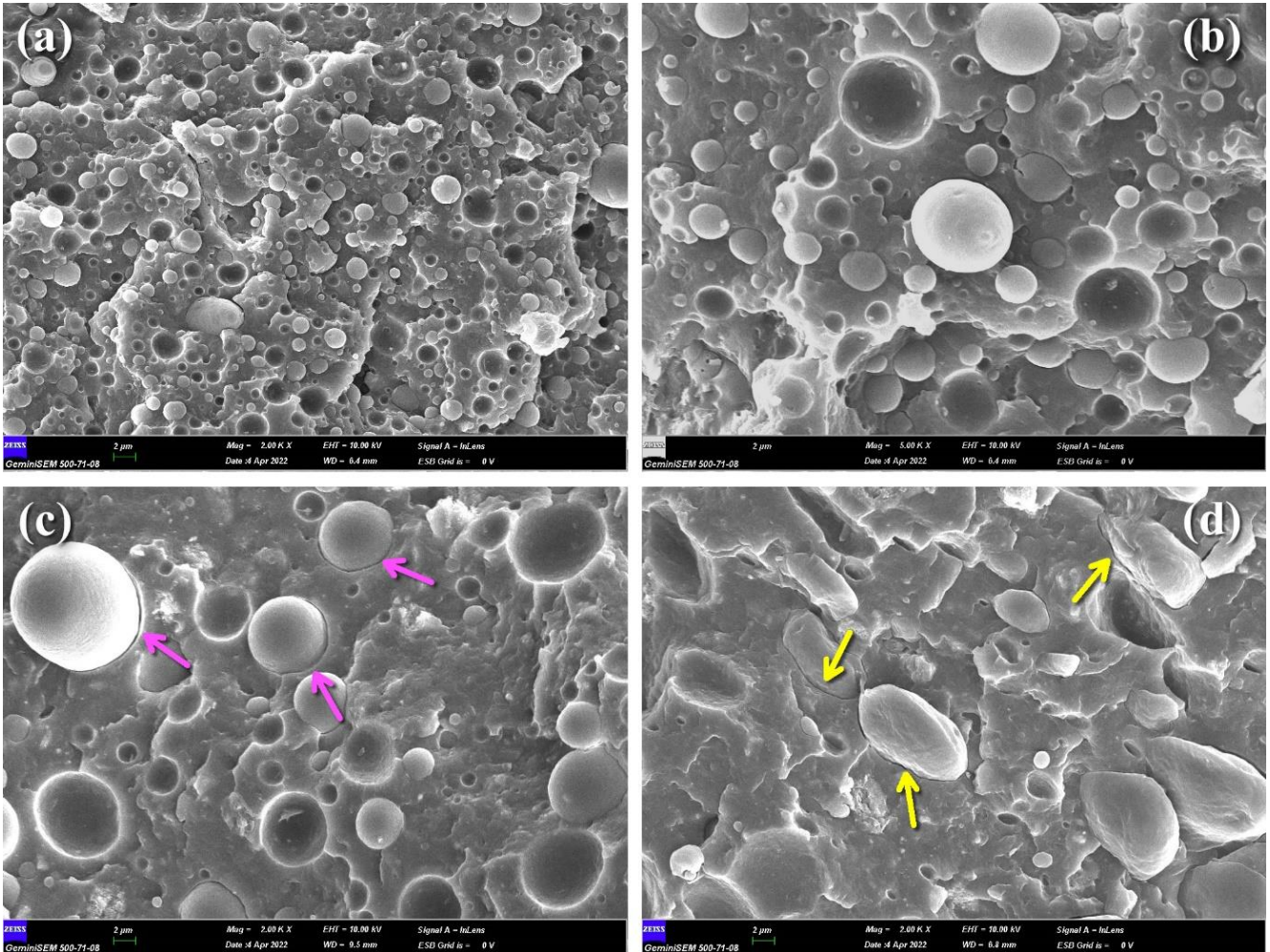
yapışmadan kaynaklanan boşlukların bulunduğu görülmektedir. Kompozitlerin ve karışımların Shore D sertlikleri, çekme gerilmesi ve eğme gerilmesi grafikleri sırasıyla Şekil 4a, b ve c'de verilmektedir. Shore D sertlikleri incelendiğinde hem HAP hem de HAP+MAPP katkısının kompozit ve karışımların sertliğini arttırdığı görülmektedir. Kemik tozunun PP matrisin sertliğini arttırdığı literatürden bilinmektedir [18]. Bazı dalgalanmalar haricinde sertlikteki artışın bileşimdeki artışla paralel olduğu tespit edilmiştir. En yüksek sertlik değerleri HAP ve MAPP'ın birlikte kullanıldığı kompozitlerde elde edilmiş olup, %30 (ağ.) HAP ve %1,5 (ağ.) MAPP içeren kompozitte en yüksek sertlik değeri olan 75,8 Shore D sertlik değerine ulaşılmıştır. Sadece MAPP katkısıyla da 80PA6/20PP karışımından yüksek sertlik değerleri elde edildiği görülmektedir. Asuke ve ark. [18]'nin bulduğu gibi sünek PP'de mekanik özellikler sert kemik tozu takviyesi ile önemli ölçüde iyileşirken, PA6'nın zaten rijit olan yapısı nedeniyle farklı sonuçlar ortaya çıkmaktadır. Şekil 4b'deki çekme gerilmesi değerleri incelendiğinde en yüksek çekme gerilmesinin saf PA6'ya ait olduğu görülmektedir. 80PA6/20PP karışımına göre sadece MAPP katkılı numunelerin en yüksek çekme gerilmesi değerlerini verdiği tespit edilmiştir. Özellikle %20 (ağ.) ve üzerindeki HAP konsantrasyonlarında uyumlaştırıcı olsun ya da olmasın saf karışımdan daha yüksek çekme gerilmesi değerlerine ulaşılmıştır. Benzer durum, Şekil 4c'deki eğme gerilmesi grafiğinde de kendini göstermektedir. %10 (ağ.) HAP konsantrasyonu için eğme ve çekme gerilmesi değerlerinin katkısız 80PA6/20PP karışımından daha düşük olduğu bulunmuştur. Bunun, %10 (ağ.) HAP konsantrasyonunda karışım veriminin düşük olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. 80PA6/20PP karışımları için en yüksek çekme gerilmesine 80PA6/20PP-1 MA numunesinde ulaşılmışken, en yüksek eğme gerilmesi 80PA6/20PP-0,25 MA numunesinde gözlenmiştir. 80PA6/20PP numunesinin eğilme mukavemeti saf PA6'dan daha yüksektir. PA6 yüksek mukavemete sahip bir polimer iken sünekliği saf PP'ye göre nispeten daha düşüktür. Eğme deneyinde gevrek tarzda hasara uğradığı görülmektedir. PP ilavesi ile birlikte gevrek kırılma yerini sünek kırılmaya bırakmıştır. Takviyesiz karışımlar içerisinde bu konsantrasyonun (%20 ağ. PP) eğme mukavemeti için optimum olduğu görülmektedir. Artan PP oranı ile eğilme mukavemetinde de çekme mukavemetinde olduğu gibi azalma görülmektedir. PP konsantrasyonundaki artış ile çekme mukavemetindeki azalma PA6/PP/MAPP/karbon fiber kompozitlerde de elde edilmiştir [8]. Zhou ve ark. [34] poli(L-laktik) (PLLA)/öğütülmüş kemik tozu kompozitlerinin mekanik özelliklerini inceledikleri çalışmalarında kemik tozu miktarının artmasıyla kompozitlerin eğilme mukavemeti ve kesme mukavemeti değerlerinin azalırken, eğilme modülü değerlerinin arttığını bulmuşlardır. Kompozitlerin kırılma şeklinin ise, artan kemik tozu içeriğiyle birlikte sünek kırılmadan gevrek kırılmaya dönüştüğünü tespit etmişlerdir. Sonuç olarak, kemik külü katkısının sertlik üzerinde, uyumlaştırıcı katkısının ise çekme ve eğme gerilmesi üzerinde daha etkili olduğu bulunmuştur. Bu durum saf polimerden daha yüksek rijitliğe sahip olan kemik külünün kompozit sertliğini arttırmasına dayandırılmıştır. %20 ve %30 kemik külü katkısında en yüksek sertlik değerlerine ulaşılmıştır.

Uyumlaştırıcı kullanımı ise polimer bileşenler arasında oluşturduğu bağ yapısından dolayı mekanik özelliklere katkı sağlamıştır. Kemik külünün matris malzemeleri ile yeterli yapışma verimine sahip olmaması ve çentik etkisi oluşturmasının çekme ve eğme gerilmelerinin artmasına ve sonuçta kompozit mukavemetin düşmesine sebep olduğu düşünülmektedir. Kısa fiber takviyeli kompozitlerde karşılaşılan her bir fiber ucunun oluşturduğu etkiye benzer şekilde, partikül takviyeli kompozitlerde de yetersiz yapışma verimi ve ara yüzeyde bulunabilen mikro çatlaklar mekanik özellikleri kötüleştirebilmektedir. Mevcut çatlaklar ve hataların bulunduğu kısımlarda çekme gerilmesi artmakta ve dayanım azalmaktadır. Eğme deneyinde de hem çekme hem basma gerilmeleri olduğu için benzer bir sonuçla karşılaşmıştır. %20 ve %30 kemik külü içeren numunelerde uyumlaştırıcı ilavesi ile eğme mukavemetinin düştüğü görülmektedir. Bu durum yukarıda bahsedildiği gibi artan takviye oranı ile hata ihtimalinin artması ve kullanılan uyumlaştırıcı miktarının yeterli olmamasından kaynaklandığı düşünülmektedir. HAP içermeyen kompozitlerde ise eğilme mukavemeti uyumlaştırıcı içeriği artmıştır. Bu durumun, uyumlaştırıcı kullanımının daha önce ifade edildiği gibi polimer bileşenler arasındaki bağ verimini iyileştirmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

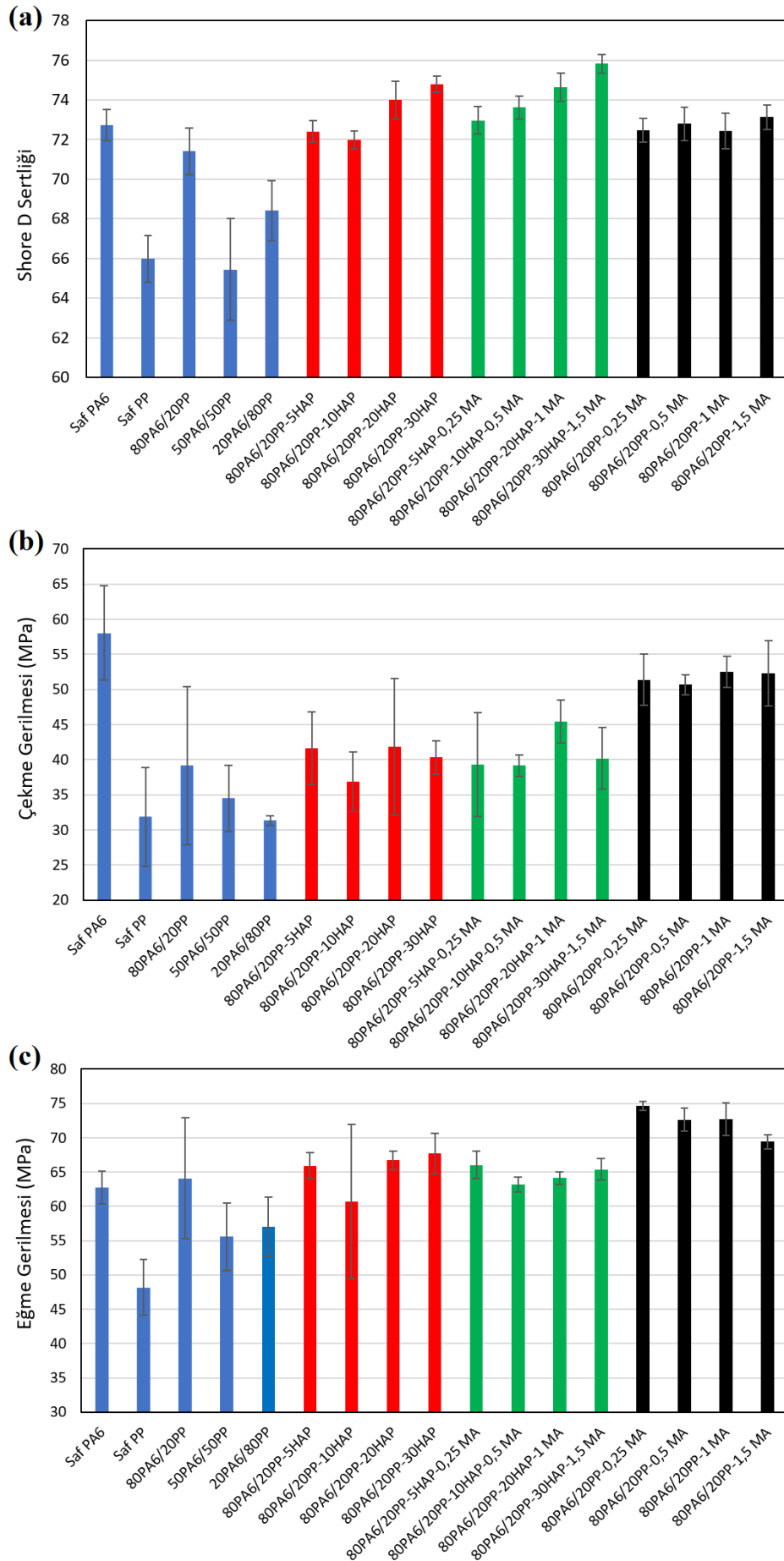
Benzer durum, çekme deneyi sonuçlarında da görülmektedir.

3.2 Aşınma Test Sonuçları

“Trapezoidal area model” [33] yaklaşımında izlerin tam dairesel oluşmamasından kaynaklanan hatalar en aza indirilmeye çalışılır (Şekil 5). Bu durum genellikle polimer karışımlarda veya kompozitlerde yapının homojen olmaması ve farklı segmentlerde aşınmaya karşı direncin değişmesinden kaynaklanmaktadır. İki boyutlu olarak aşınma iz genişliklerinin ölçülmesinde şu şekilde bir yaklaşım izlenir: İzlerin optik mikroskop görüntüleri alındıktan sonra iz iç ve dış hatları özel bir yazılım vasıtasıyla belirlenir. Bu uzunluklar ile alanlar yazılım tarafından otomatik olarak hesaplanmaktadır. Değerler formül (3)'te yerine konularak ortalama iz genişliğine ulaşılır. Burada b_a ortalama iz genişliği (mm), A_w iç ve dış çizgiler arasında kalan alan (mm^2), l_o ve l_i sırasıyla aşınma izinin dışında ve içinde kalan çevre çizgileridir (mm). b_a ortalama iz genişliğinin bulunmasından sonra bu değer denklem (1)'de aşınma hacminin hesaplanması için kullanılır ve ardından aşınma oranı hesabına (formül 2) geçilir. Numunelerin yazılım ile belirlenen aşınma izi geometrik değerleri Tablo 2'de özetlenmektedir.



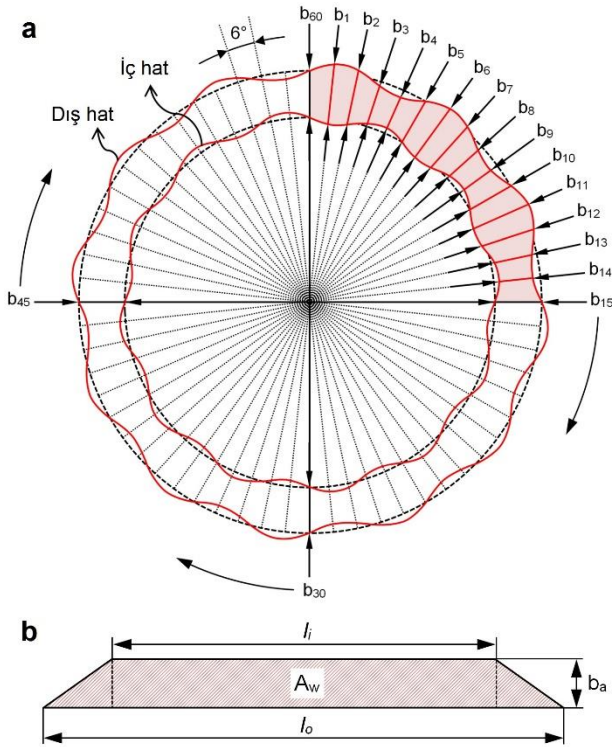
Şekil 3. (a), (b) 80PA6/20PP-30HAP-1,5 MA, (c), (d) 80PA6/20PP-30HAP numunelerinin sıvı azot ortamında bekletilip kırılması ile elde edilen kırık yüzey SEM fotoğrafları.



Şekil 4. Kompozitlerin ve karışımların (a) Shore D sertliklerinin, (b) çekme gerilmesi değerlerinin, (c) eğme gerilmesi değerlerinin bileşime göre değişimi.

Tablo 2. Numunelerin yazılım ile belirlenen aşınma izi geometrik ölçüleri.

Numune Kodu	"Trapezoidal area model" yaklaşımı için değerler				
	Alan 1 (mm ²)	Alan 2 (mm ²)	Dış çevre, l_o (mm)	İç çevre, l_i (mm)	b_a (mm)
Saf PA6	120,405	100,346	38,910	35,522	0,539
Saf PP	132,972	108,241	40,890	36,893	0,636
80PA6/20PP	148,059	94,782	43,422	34,660	1,365
50PA6/50PP	129,345	94,901	40,415	34,614	0,918
20PA6/80PP	120,037	102,475	38,851	35,897	0,470
80PA6/20PP-5HAP	124,874	106,941	39,626	36,671	0,470
80PA6/20PP-10HAP	127,616	110,936	40,058	37,349	0,431
80PA6/20PP-20HAP	120,030	104,410	38,850	36,233	0,416
80PA6/20PP-30HAP	129,084	112,578	40,289	37,625	0,424
80PA6/20PP-5HAP-0,25 MA	120,757	105,167	38,967	36,365	0,414
80PA6/20PP-10HAP-0,5 MA	122,142	106,843	39,192	36,653	0,403
80PA6/20PP-20HAP-1 MA	118,574	104,640	38,613	36,275	0,372
80PA6/20PP-30HAP-1,5 MA	116,602	103,191	38,291	36,022	0,361
80PA6/20PP-0,25 MA	128,082	108,114	40,132	36,871	0,519
80PA6/20PP-0,5 MA	123,235	101,947	39,365	35,803	0,566
80PA6/20PP-1 MA	122,868	102,641	39,306	35,926	0,538
80PA6/20PP-1,5 MA	121,548	101,046	39,095	35,645	0,549

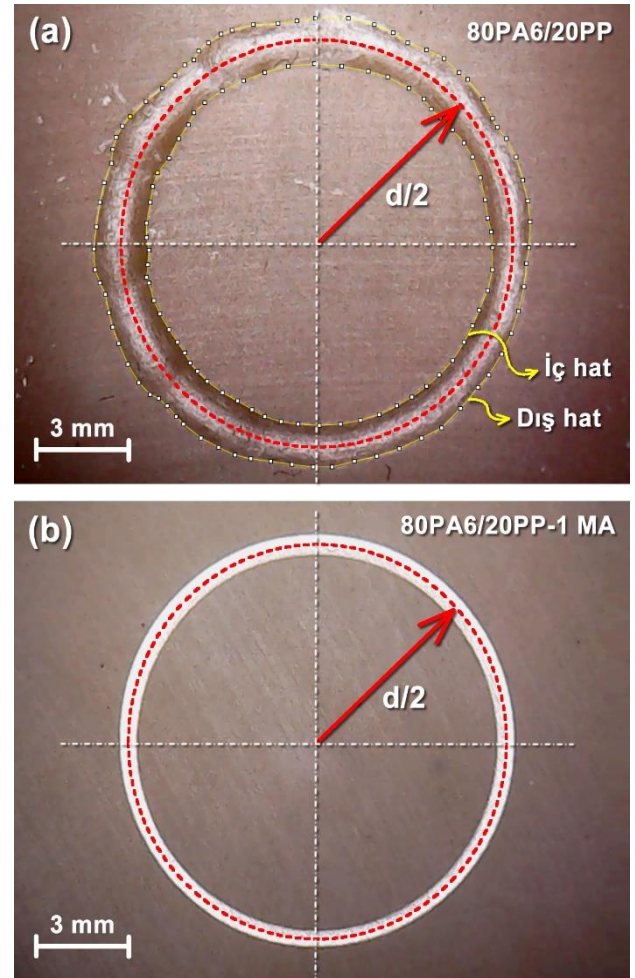


Şekil 5. (a) Homojen genişliğe sahip olmayan bir aşınma izinde veri toplamının zorluğunu gösteren şematik diyagram, (b) alternatif "trapezoidal area model" yaklaşımı için alan hesabı.

$$b_a = 2 \frac{A_w}{(l_o + l_i)} \quad (3)$$

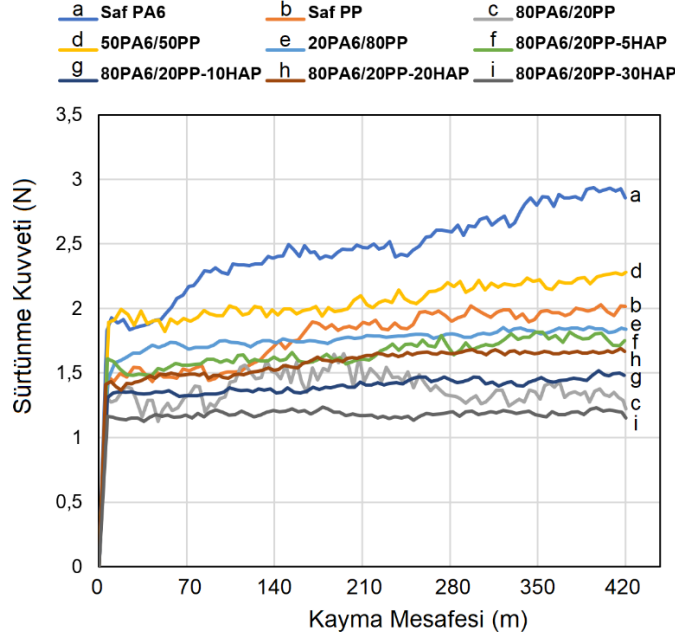
Numunelerin aşınma izi profilleri incelendiğinde yalnızca 80PA6/20PP ve 50PA6/50PP numunelerinin homojen aşınma izi profiline sahip olmadığı görülmüştür. Bu durum, uyumlaştırıcı kullanılmadığında PA6 ve PP'nin karışım veriminin düşük olmasından ve aşınma izinde farklı oranlarda aşınan segmentlerin oluşmasından kaynaklanmaktadır. Şekil 6a'da, 80PA6/20PP numunesinin aşınma testi sonrası aşınma profili optik mikroskop fotoğrafı görülmektedir. Yazılımla toplam aşınma alanının belirlenmesinde kullanılan iç ve dış hatlar sarı çizgi ile gösterilmiştir. Bahsedilen numuneler

dışındaki diğer numunelerde MAPP kullanımı veya PP oranının yüksek olmasından dolayı nispeten daire şeklinde düzgün aşınma izi profilleri elde edilmiştir (Şekil 6b). Bu numunelerde iç ve dış hatlar tam daire şablonu kullanılarak belirlenmiştir.



Şekil 6. (a) 80PA6/20PP numunesinin homojen genişliğe sahip olmayan aşınma izi optik mikroskop görüntüsü ve yazılımla toplam aşınma alanının belirlenmesinde kullanılan iç ve dış hatlar, (b) 80PA6/20PP-1 MA numunesinin uyumlaştırıcı kullanımı ile genişliği nispeten homojen oluşan aşınma izi optik mikroskop görüntüsü.

Polimer kompozitlerin mekanik özellikleri ile kayma aşınma direnci arasında genellikle yakın bir ilişki vardır. Polimerlerin mukavemeti ve çekme modülü takviye malzemeleri ile arttırılırsa, aşınma direncinde de iyileşme beklenmesi doğaldır [35]. Bununla birlikte, doğal malzeme takviyeli kompozitlerin aşınma mekanizmaları ile ilgili literatür oldukça kısıtlıdır. Bu tür takviyeli polimer kompozitlerin aşınma direnci, takviye ile matris arasındaki iyi bir ara yüzey bağı ile gelişirken, takviye ve matris tipine bağlı olarak takviye hacim oranı ile de



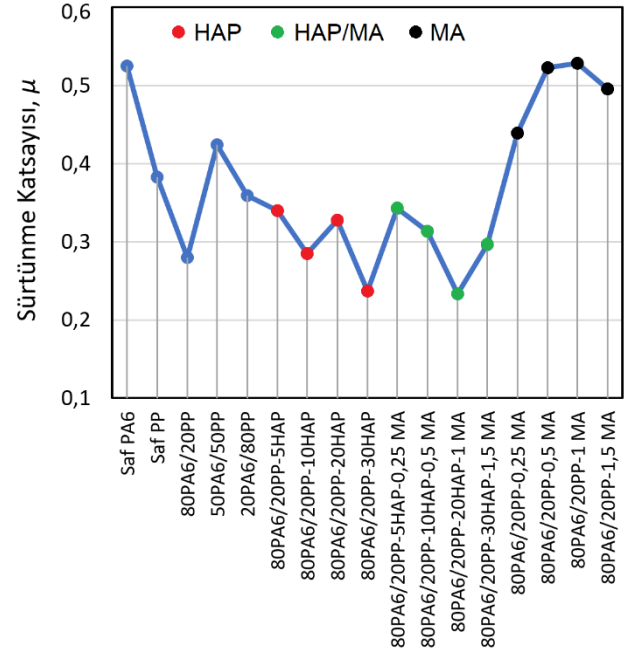
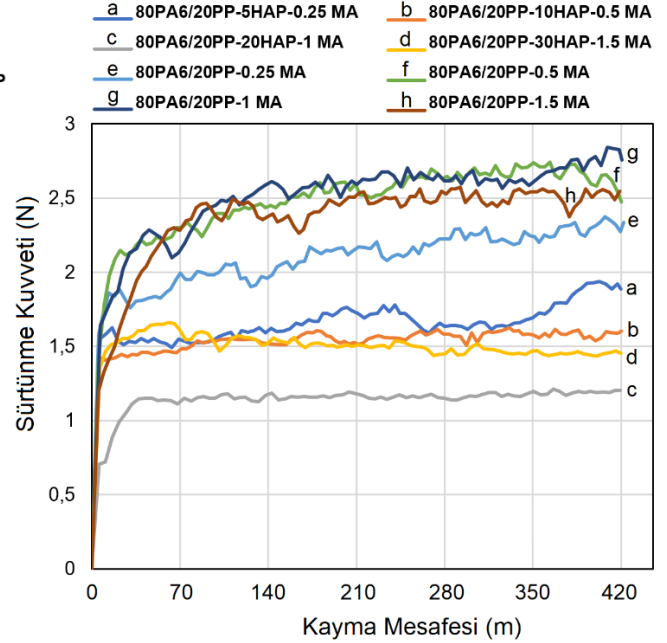
Şekil 7. Kompozitlerin ve karışımların sürtünme kuvvetlerinin kayma mesafesine göre değişimi.

Bununla birlikte 80PA6/20PP numunesinin sürtünme kuvveti eğrisinin nispeten daha dalgalı olduğu dikkat çekmektedir. Yukarıda bahsedildiği gibi uyumlaştırıcı kullanılmayan numunede karışma verimi düşük olduğundan değişken bir profil gözlenmiştir. Uyumlaştırıcı kullanılmayan numunelerde karışımı oluşturan polimerler farklı segmentler meydana getirmekte ve dalgalı bir aşınma izi profili oluşmaktadır [33]. Bu durum aşınma oranlarında konsantrasyona bağlı lineer bir değişim meydana getirmekle birlikte, sürtünme katsayılarında dalgalı ve değişken bir profil oluşturabilmektedir.

Kompozitlerin ve polimer karışımların sürtünme katsayılarının bileşime göre değişimini veren Şekil 8'deki grafik incelendiğinde sürtünme katsayılarının HAP ve HAP+MAPP içeren kompozitlerde oldukça düşük seviyede seyrettiği anlaşılmaktadır. Ayrıca yüksek konsantrasyondaki kemik küllü içeriğinin sürtünme katsayısını azaltıcı yönde etki gösterdiği görülmektedir. Kemik küllünün içerdiği karbon bileşimi ile yağlayıcı etki göstermesinin, ayrıca MAPP ile birlikte sinerjik etki göstererek yapışma veriminin iyileşmesinin bu artıştaki ana etkenler olduğu düşünülmektedir.

En düşük sürtünme katsayısı olan $\mu=0,23$ 'e 80PA6/20PP-30HAP ve 80PA6/20PP-20HAP-1 MA kompozitlerinde ulaşılmıştır. Sadece MAPP içeren karışımların ise en yüksek μ değerlerini verdiği tespit edilmiştir.

değişebilir. Ayrıca polimerler, viskoelastik yapıları ve kolay malzeme transferine izin vermeleri nedeniyle metallere ve seramiklere farklı aşınma özelliklerine sahiptirler [36]. Polimer kompozitlerde takviye malzemeleri de bu olaya dahil olduğunda kayma koşullarına bağlı olarak aşındırıcı etki görülebilmektedir. Şekil 7'de kompozitlerin ve karışımların sürtünme kuvvetlerinin kayma mesafesine göre değişimi görülmektedir. Sürtünme kuvvetleri belirli bir kayma mesafesi sonunda nispeten stabil kalmaktadır.



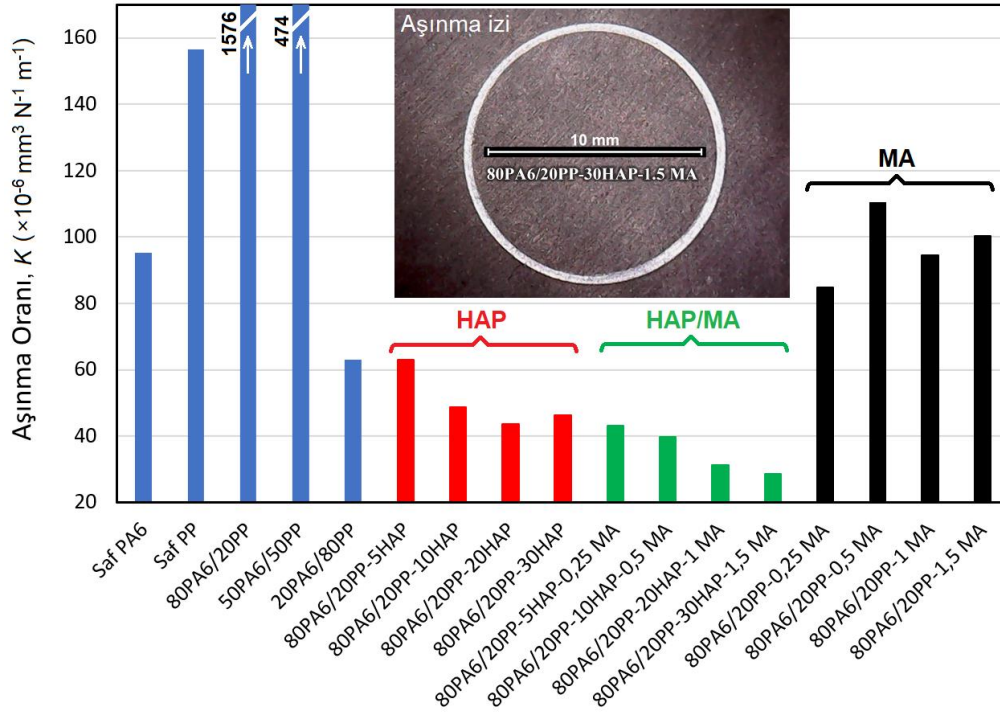
Şekil 8. Kompozitlerin ve karışımların sürtünme katsayılarının bileşime göre değişimi.

Buradan kemik küllünün içerdiği karbon bileşimi ile yağlayıcı etki göstermesi ile birlikte, uyumlaştırıcı kullanımının polimer bileşenlerden ziyade takviye fazı ile matris fazı arasında karışım verimini arttırarak sürtünme ve aşınma özellikleri üzerinde daha etkili olduğu

sonucuna ulaşılabilir. Sonuç olarak kemik külü düşük sürtünme ve aşınma oranları üzerinde baskın rol oynamıştır. Daha önce belirtildiği gibi uyumlaştırıcı içermeyen kompozitler için %30 (ağ.) HAP konsantrasyonunda, uyumlaştırıcı içeren kompozitlerde ise %20 (ağ.) HAP konsantrasyonunda optimum sürtünme katsayısına ulaşılmıştır. Takviye fazı içermeyen numunelerde ise sürtünme katsayıları genel olarak saf PA6 ile saf PP arasında olacak şekilde değişmiştir. Kompozitlerin ve karışımların aşınma oranlarının bileşime göre değişim grafiği Şekil 9'da verilmektedir. Saf PA6, saf PP'ye göre daha rijit olmasından dolayı yüksek aşınma direnci göstermiştir. Poliamidin diğer polimerlere nazaran çeliğe karşı kayma aşınma direncinin yüksek olduğu da bilinmektedir [37]. Bununla birlikte uyumlaştırıcı içermeyen karışımlarda PP'nin konsantrasyonunun artmasıyla aşınma oranının azaldığı görülmektedir. 80PA6/20PP numunesi ile en yüksek aşınma oranı olan $K = 1576 \times 10^{-6} \text{ mm}^3 \text{ N}^{-1} \text{ m}^{-1}$ değeri elde edilmiştir.

Grafik incelendiğinde HAP ve HAP+MAPP içeren kompozitlerin aşınma oranlarının oldukça düşük, dolayısıyla aşınma dirençlerinin yüksek olduğu

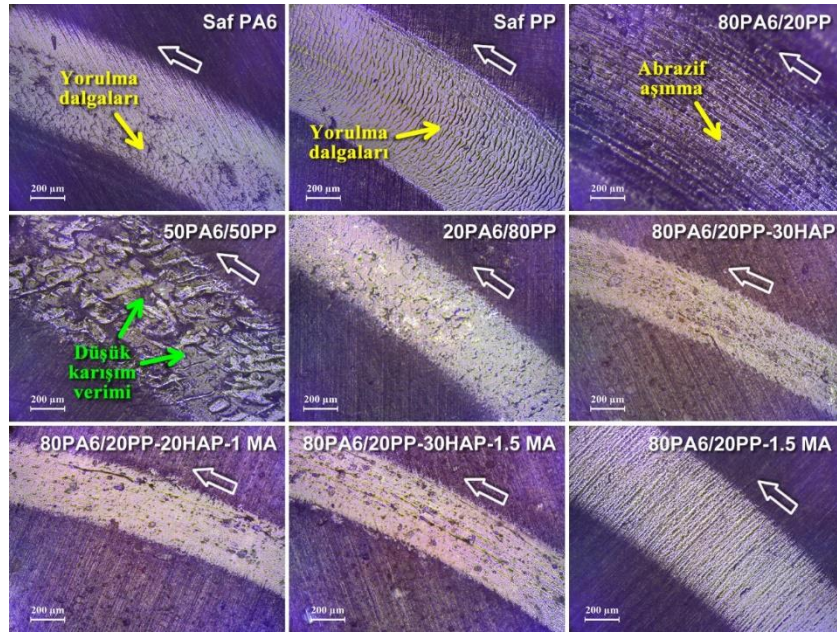
görülmektedir. Kemik külü konsantrasyonuna bağlı olarak da aşınma oranlarının azalması dikkat çekicidir. Uyumlaştırıcı kullanımı ile bu oran daha da azalmış ve 80PA6/20PP-30HAP-1,5 MA içeren kompozitte en düşük aşınma oranı olan $K = 28,5 \times 10^{-6} \text{ mm}^3 \text{ N}^{-1} \text{ m}^{-1}$ değerine ulaşılmıştır. Bu oran 80PA6/20PP numunesi ile elde edilen aşınma oranının yaklaşık %2'si kadardır. Uyumlaştırıcı ve kemik külü içermeyen 80PA6/20PP ile birlikte 50PA6/50PP numunesinde de oldukça yüksek aşınma oranı gözlenmiştir. Sadece MAPP kullanımı ile de aşınma oranlarının ciddi oranlarda iyileştiği grafikten görülebilmektedir. Fakat bu değerler kemik külü kullanılan numunelerin çok gerisinde kalmaktadır. Asuke ve ark. [38] PP/kemik külü kompozitlerde kemik külü konsantrasyonunun artması ile (%0-15) abrazyif aşınma direncinin de iyileştiğini bulmuşlardır. Ayrıca PP/PA6/nano-kil (%7,5) kompozitlerle yapılan bir çalışmada da [13] kayma aşınması şartlarında benzer düşük sürtünme katsayısı ve aşınma oranı değerlerine nano-kil takviyesi ile ulaşılmıştır. Sonuç olarak, kemik külü ve MAPP sinerjik etkisi ile elde edilen PP/PA6 matrisli kompozitlerde oldukça yüksek aşınma direnci değerlerine ulaşılacağı bu çalışmayla kanıtlanmıştır.



Şekil 9. Kompozitlerin ve karışımların aşınma oranlarının bileşime göre değişimi.

Farklı numunelere ait aşınma izi optik mikroskop görüntüleri Şekil 10'da verilmektedir. Si_3N_4 bilyelerde bilyelerin sahip olduğu yüksek aşınma direncinden dolayı belirgin bir aşınma izine rastlanılmamıştır. Numunelerde genel olarak adeziv ve abrazyif aşınma mekanizmalarının baskın olduğu görülmektedir. Homojen aşınma iz genişliğine sahip olmayan 80PA6/20PP ve 50PA6/50PP numunelerinin sırasıyla abrazyif ve düşük karışım veriminden dolayı segmentli aşınma bölgeleri içerdiği görüntülerden de anlaşılmaktadır. Bu yüzden en yüksek aşınma oranlarına uyumlaştırıcı içermeyen bu numunelerde rastlanmıştır. Kemik külü içeren kompozitlerde ise belirgin bir aşınma mekanizmasının hâkim olmadığı görülmektedir. Polimer kompozitlerde

adeziv ve abrazyif aşınma mekanizmalarından başka "yorulma dalgaları veya kırıkları" adı verilen bir başka aşınma mekanizması da görülebilmektedir. Bu tür bir hasar genellikle aşındırıcı malzeme üzerindeki bir çıkıntının veya pürüzün aşınan malzeme yüzeyi üzerinde tekrarlı çevrimler sonucu oluşturduğu yorulma aşınmasının bir sonucu olarak görülmektedir. Yorulma aşınması ayrıca numunedeki gerilme veya kusur konsantrasyonuna bağlı olarak da artış gösterebilmektedir [39]. Yorulma dalgaları saf PP'de daha yoğun olmak üzere saf PA6'da da rastlanmıştır. HAP, MAPP ve HAP+MAPP içeren kompozitlerde bu belirtiler görülmemektedir.



Şekil 10. Kompozitlerin ve karışımların aşınma izlerinin optik mikroskop görüntüleri (içi boş oklar bilyenin kayma yönünü göstermektedir).

4 Sonuçlar

Bu çalışmada, PP/PA6 karışımlarına kemik külü ve uyumlaştırıcı olarak MAPP katkısının kompozitlerin mekanik ve ayrıca tribolojik özelliklerine etkileri araştırılmıştır. Hem HAP hem de HAP+MAPP katkısının kompozitlerin sertliğini arttırdığı bulunmuştur. Bu durum, kemik külünün polimerlere nazaran yüksek rijitliğe sahip olmasına dayandırılmıştır. Çekme ve eğme gerilmelerinde uyumlaştırıcı kullanılan karışımların kemik külü içerenlere göre daha yüksek değerler verdiği tespit edilmiştir. Kemik külü içeren numuneler ise (%10 hariç) içermeyenlerden genel olarak yüksek değerlere sahip olup, %20 ve %30 kemik külü katkısında en yüksek mekanik özelliklere ulaşılmıştır. Kemik külü ve uyumlaştırıcının etkisi en çok sürtünme katsayısı ve aşınma direnci özelliklerinde kendini göstermiştir. HAP ve HAP+MAPP içeren kompozitlerde oldukça düşük sürtünme katsayısı ve aşınma oranı değerlerine ulaşılmıştır. Kemik külü konsantrasyonuna bağlı olarak lineer bir iyileşme gözlenirken, 80PA6/20PP-30HAP-1,5 MA içeren kompozitte en düşük aşınma oranı olan $K = 28,5 \times 10^{-6} \text{ mm}^3 \text{ N}^{-1} \text{ m}^{-1}$ değerine ulaşılmıştır. Bu oran 80PA6/20PP numunesi ile elde edilen aşınma oranının yaklaşık %2'si kadardır. Kemik külünün içerdiği karbon bileşimi ile yağlayıcı etki göstermesinin, ayrıca MAPP ile birlikte sinerjik etki göstererek yapışma veriminin iyileşmesinin bu artıştaki ana etkenler olduğu düşünülmektedir. MAPP ve HAP içeren kompozitlerde ayrıca abrazif aşınmanın düşük olduğu da tespit edilmiştir. Yorulma dalgaları da bu kompozitlerde görülmemektedir. Sonuç olarak, PA6/PP/HAP/MA kompozitleri mekanik ve aşınma direnci gerektiren uygulamalar için ümit vadetmekte olup, PA6/PP karışımlarında olduğu gibi özellikle ambalaj ve otomotiv sanayi parçalarında kullanım potansiyeline sahiptir.

Teşekkür

Millî Savunma Bakanlığı, 2'nci Ana Bakım Fabrika Müdürlüğü'ne katkılarından dolayı teşekkür ederiz.

Açıklamalar

Bu çalışmada Etik Kurul Onay belgesine gerek bulunmamaktadır.

Kaynaklar

- [1] Karimah, A., Ridho, M. R., Munawar, S. S., Adi, D. S., Ismadi, Damayanti, R., Subiyanto, B., Patriasari, W., & Fudholi, A. (2021). A review on natural fibers for development of eco-friendly bio-composite: Characteristics, and utilizations. *Journal of Materials Research and Technology*, 13, 2442-2458.
- [2] Pickering, K. L., Aruan Efendy, M. G., & Le, T. M. (2016). A review of recent developments in natural fibre composites and their mechanical performance. *Composites Part A – Applied Science and Manufacturing*, 83, 98-112.
- [3] Peças, P., Carvalho, H., Salman, H., & Leite, M. (2018). Natural fibre composites and their applications: A review. *Journal of Composites Science*, 2(4), 66.
- [4] Ayrilmis, N., & Ashori, A. (2016). Alternative solutions for reinforcement of thermoplastic composites. *Natural Fiber Composites*, CRC Press, 65-92.
- [5] Shubhra, Q. T. H., Alam, A. K. M. M., & Quaiyyum, M. A. (2011). Mechanical properties of polypropylene composites: A review. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 26(3), 362-391.
- [6] Rocha, J. A., Steffen, T. T., Fontana, L. C., & Becker, D. (2021). Effect of maleic anhydride and oxygen functionalized carbon nanotube on polyamide 6 and polypropylene blend properties. *Polymer Bulletin*, 78, 5623-5639.
- [7] Kang, D. H., Hwang, S. W., Jung, B. N., & Shim, J. K. (2019). Characterization and morphological development of polypropylene/polyamide 6 blends using polyamide 6 powder and single-walled carbon nanotube. *Journal of Composite Materials*, 53(16), 2197-2207.
- [8] Do, V.-T., Nguyen-Tran, H.-D., & Chun, D.-M. (2016). Effect of polypropylene on the mechanical properties and water absorption of carbon-fiber-reinforced-polyamide-6/polypropylene composite. *Composite Structures*, 150, 240-245.

- [9] Jha, N. S., Rathod, P., Wagh, S. M., & Pande, S. A. (2018). Investigation on the mechanical, thermal properties of polyamide 6/polypropylene blends with natural talc as filler. *Proceedings of the International Conference on Multidimensional Role of Basic Science in Advanced Technology - ICMBAT 2018*, 2104, 020019-1-020019-10.
- [10] Chow, W. S., Mohd Ishak, Z. A., Karger-Kocsis, J., Apostolov, A. A., & Ishiaku, U. S. (2003). Compatibilizing effect of maleated polypropylene on the mechanical properties and morphology of injection molded polyamide 6/polypropylene/organoclay nanocomposites. *Polymer*, 44, 7427-7440.
- [11] Gahleitner, M., Kretschmar, B., Pospiech, D., Ingolic, E., Reichelt, N., & Bernreitner, K. (2006). Morphology and mechanical properties of polypropylene/polyamide 6 nanocomposites prepared by a two-step melt-compounding process. *Journal of Applied Polymer Science*, 200, 283-291.
- [12] Chow, W. S., Ishak, Z. A. M., Ishiaku, U. S., Karger-Kocsis, J., & Apostolov, A. A. (2004). The effect of organoclay on the mechanical properties and morphology of injection-molded polyamide 6/polypropylene nanocomposites. *Journal of Applied Polymer Science*, 91, 175-189.
- [13] Mimaroglu, A., Unal, H., & Yetgin, S. H. (2018). Tribological properties of nanoclay reinforced polyamide-6/polypropylene blend. *Macromolecular Symposia*, 379, 1700022.
- [14] Deshpande, S., & Rangaswamy, T. (2016). Sliding wear characteristics of bone powder filled hybrid fiber reinforced epoxy composites. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, 13(1), 68-78.
- [15] Omah, A. D., Okorie, B. A., Omah, E. C., Ezema, I. C., Aigbodion, V. S., & Offor, P. O. (2017). Measurement of dielectric properties of polymer matrix composites developed from cow bone powder. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 88, 325-335.
- [16] Bhuiya, A. W., Hu, M., Sankar, K., Keane, P. F., Ribero, D., & Kriven, W. M. (2021). Bone ash reinforced geopolymer composites. *Journal of the American Ceramic Society*, 104, 2767-2779.
- [17] Younesi, M., & Bahrololoom, M. E. (2010). Effect of molecular weight, particle size and ringer's solution on mechanical properties of surface-treated polypropylene-hydroxyapatite biocomposites. *Journal of Composite Materials*, 44(24), 2785-2799.
- [18] Asume, F., Aigbodion, V. S., Abdulwahab, M., Fayomi, O. S. I., Popoola, A. P. I., Nwoyi, C. I., & Garba, B. (2012). Effects of bone particle on the properties and microstructure of polypropylene/bone ash particulate composites. *Results in Physics*, 2, 135-141.
- [19] Vignesh, K., Ramasivam, G., Natarajan, U., & Srinivasan, C. (2016). Optimization of process parameters to enhance the mechanical properties of bone powder and coir fiber reinforced polyester composites by Taguchi method. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 11(2), 1224-1231.
- [20] Oladele, I. O. (2013). Development of bone ash and bone particulate reinforced polyester composites for biomedical applications. *Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies*, 22, 15-26.
- [21] Oladele, I. O., Daramola, O. O., & Adewole, A. T. (2014). Comparative study of the reinforcement efficiency of cow bone and cow bone ash in polyester matrix composites for biomedical applications. *Acta Tehnica Corviniensis – Bulletin of Engineering*, 7(4), 27-34.
- [22] Adewole, T., & Oladele, I. (2015). Effect of cow bone ash particle size distribution on the mechanical properties of cow bone ash-reinforced polyester composites. *Chemistry and Materials Research*, 7(3), 40-46.
- [23] Oladele, I. O., & Isola, B. A. (2016). Development of bone particulate reinforced epoxy composite for biomedical application. *Journal of Applied Biotechnology & Bioengineering*, 1(1), 35-40.
- [24] Uddin, M.-J., Kodali, D., & Rangari, V. K. (2021). Effect of bone ash fillers on mechanical and thermal properties of biobased epoxy nanocomposites. *Journal of Applied Polymer Science*, 138:e50046, 1-13.
- [25] Krithiga, G., & Sastry, T. P. (2011). Preparation and characterization of a novel bone graft composite containing bone ash and egg shell powder. *Bulletin of Materials Science*, 34(1), 177-181.
- [26] Igwe, I. O., & Onuegbu, G. C. (2012). Studies on properties of egg shell and fish bone powder filled polypropylene. *American Journal of Polymer Science*, 2(4), 56-61.
- [27] Roeder, J., Oliveira, R. V. B., Gonçalves, M. C., Soldi, V., & Pires, A. T. N. (2002). Polypropylene/polyamide-6 blends: Influence of compatibilizing agent on interface domains. *Polymer Testing*, 21, 815-821.
- [28] Yoon, B. S., Joang, J. Y., Suh, M. H., Lee, Y. M., & Lee, S. H. (1997). Mechanical properties of polypropylene/polyamide 6 blends: Effect of manufacturing processes and compatibilization. *Polymer Composites*, 18(6), 757-764.
- [29] Zeng, N., Bai, S. L., G'Sell, C., Hiver, J.-M., & Mai, Y. W. (2002). Study on the microstructures and mechanical behaviour of compatibilized polypropylene/polyamide-6 blends. *Polymer International*, 51, 1439-1447.
- [30] Zhou, X., Zhang, P., Jiang, X., & Rao, G. (2009). Influence of maleic anhydride grafted polypropylene on the miscibility of polypropylene/polyamide-6 blends using ATR-FTIR mapping. *Vibrational Spectroscopy*, 49, 17-21.
- [31] Holsti-Miettinen, R., Seppälä, J., & Ikkala, O. T. (1992). Effects of compatibilizers on the properties of polyamide/polypropylene blends. *Polymer Engineering and Science*, 32(13), 868-877.
- [32] El-Sabbagh, A. (2014). Effect of coupling agent on natural fibre in natural fibre/polypropylene composites on mechanical and thermal behaviour. *Composites Part B – Engineering*, 57, 126-135.
- [33] Savaş, S., & Al-Obaidi, A. Y. (2018). Influence of PP-g-MA compatibilization on the mechanical and wear properties of polypropylene/thermoplastic polyurethane blends. *Tribology Transactions*, 61(4), 754-764.
- [34] Zhou, Z., Liu, X., Liu, L., & Yi, Q. (2009). Fabrication and properties of composite biomaterials composed of poly(L-lactide) and bovine bone. *Designed Monomers and Polymers*, 12, 57-67.
- [35] Morioka, Y., Tsuchiya, Y., & Shioya, M. (2015). Correlations between the abrasive wear, fatigue, and tensile properties of filler-dispersed polyamide 6. *Wear*, 338-339, 297-306.
- [36] Österle, W., Dmitriev, A. I., Wetzel, B., Zhang, G., Häusler, I., & Jim, B. C. (2016). The role of carbon fibers and silica nanoparticles on friction and wear reduction of an advanced polymer matrix composite. *Materials & Design*, 93, 474-484.
- [37] Ravi Kumar, B. N., Suresha, B., & Venkataramareddy, M. (2009). Effect of particulate fillers on mechanical and abrasive wear behaviour of polyamide 66/polypropylene nanocomposites. *Materials and Design*, 30, 3852-3858.
- [38] Asume, F., Abdulwahab, M., Aigbodion, V. S., Fayomi, O. S. I., & Aponbiede, O. (2014). Effect of load on the wear behaviour of polypropylene/carbonized bone ash particulate composite. *Egyptian Journal of Basic and Applied Sciences*, 1(1), 67-70.
- [39] Myshkin, N. K., Petrokovets, M. I., & Kovalev, A. V. (2005). Tribology of polymers: Adhesion, friction, wear, and mass-transfer. *Tribology International*, 38, 910-921.