



FARKLI BOYUTLARDA FINDIKKABUĞU PARTİKÜL TAKVİYELİ PMMA KOMPOZİTLERİN MEKANİK VE KIRILMA DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ.

Kenan BÜYÜKKAYA^{1*}, Halil DEMİRER²

¹ Giresun Üniversitesi, Bulancak Meslek Yüksekokulu, Makine Programı, Giresun, Türkiye

² Marmara Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Malzeme ve Metalurji Bölümü, İstanbul, Türkiye

Anahtar Kelimeler	Öz
Kompozit, Fındık Partikülü, Özellikler, PMMA, Kırılma Tokluğu	Tarımsal atıkların kullanımı, çevresel hassasiyetlerin artması ve atıkların ekonomiye kazandırılması gibi duyarlılıklardan dolayı gün geçtikçe yaygınlaşmaktadır. Bu çalışmanın amacı atık olarak değerlendirilen fındikkabuğunun kompozit malzeme üretiminde kullanılabilirliğini araştırmaktır. Kompozit deney materyali, maksimum, 50, 150, 250, 425 µm boyutlara ve %5, %10, %15, %20 ağırlık oranlarına sahip, fındikkabuğu partikülleri dolgusu ile üretilmiştir. Numunelere, ısıl kür işleminden sonra başlangıç çentik oranı (Çentik uzunluğu/ Numune genişliği) $a/W= 0,3$ olan başlangıç çentiği açılmıştır. Bu numunelerin mod I (çatlak açılma) kırılma davranışları üç nokta eğme testi yardımı ile belirlenmiştir. Kritik Gerilme Şiddet Faktörü, Başlangıç Çentik Derinliği metodu yardımı ile hesaplanmıştır. Eğilme modülü ve eğilme gerilmeleri üç nokta eğme testi ile darbe dayanımı değerleri de Standart çentikler kullanılarak belirlenmiştir. Fındikkabuğu /polimetilmetakrilat kompozitlerin bileşimi ve mikro yapısı Fourier Transform Infrared Spektrofotometre ve Scanning Electron Microscope ölçümleri ile ortaya konulmuştur. Araştırmanın bulgularına göre, 0-50 µm boyutlarında fındikkabuğu partikülleri ile üretilen kompozitlerin mekanik özellikleri, büyük boyutlu takviye ile üretilen kompozitlerden daha yüksektir.

INVESTIGATION OF MECHANICAL AND FRACTURE BEHAVIOR OF NUTSHELL IN DIFFERENT SIZES PARTICLE REINFORCED PMMA COMPOSITES

Keywords	Abstract
Composite, Hazelnut Shell Particle, Mechanical Properties, PMMA, Fracture Toughness.	The use of agricultural waste is becoming more widespread day by day due to increasing environmental sensitivity and bringing waste into the economy. The aim of this study is to investigate the usability of hazelnut shells, which are treated as waste, in the production of composite materials. The composite test material was produced with a filling of hazelnut shell particles with maximum dimensions of 50, 150, 250, 425 µm and weight ratios of 5%, 10%, 15%, 20%. After the thermal curing process, an initial notch was made on the samples with an initial notch ratio (Notch length / Sample width) $a/W = 0.3$. Mode I (crack opening) fracture behavior of these samples was determined with the help of three-point bending test. Critical Stress Intensity Factor was calculated with the help of the Initial Notch Depth method. Flexural modulus and bending stresses were determined using the three-point bending test, and impact strength values were determined using Standard notches. The composition and microstructure of hazelnut shell / polymethylmethacrylate composites were revealed by Fourier Transform Infrared Spectrophotometer and Scanning Electron Microscope measurements. According to the findings of the research, the mechanical properties of composites produced with 0-50 µm sized hazelnut shell particles are higher than composites produced with large-sized reinforcement.

Alıntı / Cite

Büyükkaya, K., Demirer, H., (2024). Farklı Boyutlarda Fındikkabuğu Partikül Takviyeli PMMA Kompozitlerin Mekanik ve Kırılma Davranışlarının İncelenmesi., Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 12(4), 736-748.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

Kenan Büyükkaya, 0000-0002-8263-0756

Halil Demirer, 0000-0001-7870-5797

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date 17.11.2023

Revizyon Tarihi / Revision Date 27.08.2024

Kabul Tarihi / Accepted Date 30.10.2024

Yayın Tarihi / Published Date 25.12.2024

* İlgili yazar / Corresponding author: kenan.buyukkaya@giresun.edu.tr, +90-454-310-1531

INVESTIGATION OF MECHANICAL AND FRACTURE BEHAVIOR OF NUTSHELL IN DIFFERENT SIZES PARTICLE REINFORCED PMMA COMPOSITES.

Kenan BÜYÜKKAYA^{1†}, Halil DEMİRER²

¹ Giresun University, Bulancak Vocational School, Machine Program, Giresun, Türkiye

² Marmara University, Faculty of Technology, Department of Metallurgy and Materials Engineering, İstanbul, Türkiye

Highlights

- Hazelnut shell particles can be used in composite production.
- Hazelnut shell particle size and mechanical properties are inversely proportional.
- Hazelnut shells, which are treated as waste, can be converted into economic value.

Purpose and Scope

In this study, the mechanical properties and fracture behavior of composites formed with hazelnut shell particles were examined.

Design/methodology/approach

Composites were produced by the free casting method. Characterization of the casting test samples was carried out using Fourier Transform Infrared Spectrophotometer and Scanning Electron Microscope methods. Mechanical properties were determined by bending and impact testing.

Findings

According to the findings of the study, the mechanical and fracture strength values of composites produced with particles with a maximum size of 50 µm are higher than composites with other particle sizes..

Social Implications

Turning hazelnut shells into products instead of using them as fuel will contribute economically to producers and the country.

It will also make significant contributions to the environment by utilizing waste.

Originality

The article written is original in terms of the usability and characterization of hazelnut shells in composite production

1. Giriş (Introduction)

Polimer kompozitlerin kullanımı gün geçtikçe yaygınlaşmaktadır. Polimer içerikli malzemeler köprüler, boru hatları, diğer yapısal uygulamalar, bakım ve onarım işlerinde oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle takviyeli polimer kompozitler, fiyatlarının düşük olması, kimyasal dayanıklılık, mekanik özellikler, hafiflik, kolay üretim ve titreşim emme gibi avantajlarından dolayı imalat sektöründe tercih edilmektedir. "Bio malzeme" diye de adlandırılan kompozitlerin üretiminde çeşitli lifler ve tarımsal atıklar kullanılmaktadır (Thirupathi vd., 2024; Andrew & Dhakal,2022; Salasinska vd.,2018).

Ceviz kabuğu ve ayçiçeği sapı gibi tarımsal atıkların, orta yoğunlukta lif levhaların (MDF) üretiminde dolgu maddesi olarak kullanılabilirliğinin araştırıldığı çalışmada, levha üretiminde kullanılan takviye türü ve miktarı ile reçine oranına bağlı olarak levhalarda fiziksel (% hacimsel genişleme ve % su tutma) ve mekanik (eğilme dayanımı, basma dayanımı, elastisite modülü, sertlik ve kesme kuvveti) özelliklerin değişkenlik gösterdiği ortaya konulmuştur (Kaya,2018). Hurma çekirdeği kullanılarak üretilen kompozit malzemelerin mekanik ve ısıl özelliklerinin araştırıldığı çalışmada, yapıdaki polimer oranı artışının hem mekanik dayanımı hem de yanmazlığı artırdığı belirlenmiştir (Taşdemir vd., 2018). Lauke ve Fu (2013) nano ve mikro ölçekli boyutlarda, sert inorganik parçacıklarla takviyeli polimer kompozitlerin, artan parçacık oranı ile kırılma tokluğunun çok karmaşık bir değişime neden olduğunu belirlediler. Çalışmada, kompozitlerin etkilenme derecelerinin, bileşik gerilmenin kritik değerlerine bağlı olduğunu gösterdiler. Tazi ve arkadaşları (2015) farklı oranlarda ağaç talaşı ile takviye edilmiş yüksek yoğunluklu polietilenden yapılan biyo-kompozitlerin mekanik ve yapısal özelliklerini inceledikleri çalışmada, talaş ilavesinin kompozitin hem elastisite modülünde hem de mukavemetinde önemli bir artış sağladığını rapor ettiler. Yer fıstığı/ epoksi kompozitler ile yapılan çalışmada, epoksi/ yerfıstığı oranının

[†] Corresponding author: kenan.buyukkaya@giresun.edu.tr, +90-454-310-1531

60:40 ve 0.5 mm parçacık boyutuna sahip numunede en yüksek çekme mukavemeti, çekme modülü, eğilme modülü ve darbe mukavemeti ortaya koyduğu belirlendi (Raju vd., 2011)

Takviye olarak fındikkabuğundan kompozit malzeme üretilmesi ve bu malzemelerin mekanik özelliklerinin optimizasyonu konusunda çok az sayıda araştırma mevcuttur. Balart ve arkadaşları (2016) fındikkabuğu/PLA kompozitlere katılan plastikleştiricinin kompozitin kırılma duyarlılığını azalttığını ve termal stabiliteyi geliştirdiğini belirlediler. Çöpür ve arkadaşları (2008) Fındikkabuğu partikülünü fındık cürufu ile karıştırarak MDF üretiminde optimizasyon çalışması gerçekleştirdiler ve fındikkabuğunun maksimum %10 oranında kullanılabilirliğini belirlediler. Fındikkabuğu/üre-formaldehit polimer kompozitlerde yonga levhayı etkileyen parametrelerin incelendiği optimizasyon çalışmasında, maksimum eğilme mukavemetinin, %1.0 üre formaldehit oranında, ve ortalama 0.1 mm parçacık büyüklüğünde 4.1N/mm² olduğu gösterildi (Gürü vd.,2009).

Ülkemizde ağırlıklı olarak Karadeniz Bölgesinde yetiştirilen fındığın iç kısmı değerlendirilmekte, kabuğu ise genellikle yakacak olarak kullanılmaktadır. Türkiye’de 2021 yılında üretim miktarı 684 bin ton olan ürünün yaklaşık olarak %48’i kabuktur (İslam,2018). Yaklaşık 328 bin ton arzı olan bu maddenin yakılması yerine endüstriyel olarak kullanım alanı bulması, bu çalışmanın genel amaçlarından birisidir.

Ayrıca fındikkabuğunun takviye malzemesi olarak seçilmesinin nedenlerinden birisi de kabuğun lignin içeriği açısından birçok sert kabuklu meyveye göre daha zengin olmasındandır (Dönmez vd., 2016; Ceylan vd., 2020). Lignin ile yapılan çalışmada, bu malzeme ile üretilen kompozitlerin mekanik özelliklerinden eğilme modülü ve ısı altında eğilme sıcaklığında (HDT) dikkate değer bir artış sergilediği bildirilmiştir (Wang vd., 2024)

Bu çalışmada, fındikkabuğu partiküllerinin termoset plastiklerde takviye malzemesi olarak kullanılabilirliği tartışıldı. Fındikkabuğu partikülleri takviye malzemesi olarak kullanılarak, polimetilmetakrilat matrisli kompozitler üretildi. Mekanik özellikler bağlamında eğilme modülü ve eğilme gerilmesi çentikli darbe dayanımı değerleri tespit edildi.

Çalışmanın bulgularına göre, fındikkabuğu/polimetilmetakrilat kompozitlere ilave edilen fındikkabuğu partikül boyutu arttıkça, mekanik özelliklerde, belirli oranlardan sonra (eğilme modülü hariç) düşüş gerçekleştiği tespit edilmiştir.

2. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

2.1. Materyal (Material)

2.1.1. Fındikkabuğu (Nutshell)

Çalışmada Giresun kalite tombul fındikkabukları öğütücüde parçalanarak kompozitlerin üretilmesinde kullanılan partiküller elde edilmiştir. Toz formundaki fındık kabuğu partikülleri (FKP) boyut olarak geniş bir dağılım gösterdiğinden, etkilerini belirlemek amacı ile farklı göz açıklıklarına sahip (0,50(A)-150(B)-250(C)-425(D) µm laboratuvar elekleri yardımı ile boyutlandırılmış ve harflerle kodlanmıştır (Şekil 1). Boyutlandırma, elek göz açıklıklarına göre yapılmıştır. Takviye oranları, matrisin kompoziti iyi ıslatabileceği en üst oran belirlendikten sonra, ara oranlar belirlenerek gerçekleştirilmiştir.



Şekil 1. Boyutlandırılmış Fındikkabuğu (Sized Hazelnut Shells)

2.1.2. Polimetilmetakrilat (Polymethylmethacrylate)

Fındikkabuğu-Polimetilmetakrilat (PMMA) kompozitlerin oluşturulmasında kullanılan polimetilmetakrilat matris malzemesi ve matrisin sertleştirilmesi için kullanılan peroksit esaslı kimyasal Otto Bock (Almanya) Türkiye temsilciliğinden temin edilmiştir. Standart Polimetilmetakrilat PMMA’ya ait bazı mekanik özellikler Tablo 1’de verilmiştir (Zhang vd., 2014).

2.1.3. Test Numunelerinin üretimi (Production of test samples)

Fındıkkabuğu-Polimetilmetakrilat kompozitlerden deney numunesi oluşturmak amacı ile Politetrafloroetilen (PTFE) malzemedeki döküm kalıpları hazırlanmıştır. Matris malzemesinin sertleştirilmesi için %2 peroksit sertleştirici ilave edilmiştir. Elde edilen bu karışımın içerisine belirli oran (%5, %10, %15, %20) ve farklı büyüklükte (0,50-150-250-425 µm) fındıkkabuğu partikülleri ilave edilip manyetik karıştırıcılar ile karıştırılarak sıvı döküm malzemesi oluşturulmuştur. Hazırlanan sıvı karışım kalıplara dökülmek sureti ile işlenmiş test numuneleri elde edilmiştir. Numuneler nihai kür uygulaması için 24 saat boyunca 80 °C sıcaklıkta fırında bekletildikten sonra otomatik tezgahlarda standartlara uygun ölçülerde 80x14x7 mm olarak işlenmiştir (Şekil 2). Kırılma testi numuneleri üzerine çentik oranı standart gereği (ASTM D5045-99) (a/w) 0,5 olan çentikler açılmıştır.

Tablo 1. Standart PMMA'nın Mekanik Özellikleri (Mechanical Properties of Standard PMMA)

Kopma uzaması (%)	0,5-5
Sertlik -Rockwell (M)	93
Darbe dayanımı (kJ/m ²)	11
Poisson oranı	0,35-40
Elastisite modülü (N/mm ²)	3300
Çekme dayanımı (N/mm ²)	60-70



Şekil 2. Çentiksiz Üç Nokta Eğme Testi Numunesi (Unnotched Three-Point Bending Specimen)

2.2. Metod (Method)

2.2.1. FTIR, XRD, SEM testleri (FTIR, XRD, SEM tests)

Kompozitlerin FTIR (Fourier Transform Infrared Spectrophotometer) analizleri, Perkin Elmer Spectrum1400 spektrometresi ile 4000-650 cm⁻¹ tarama aralığında ve oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Test 2 cm⁻¹ çözünürlükte ortalama 10 tarama ile yapılmıştır.

X-ışını kırınım testi, bakır radyasyonlu gelişmiş Diffractometer (Europe 600 XRD) ile gerçekleştirilmiştir. Cu Ka, 40 kV ve 30 mA'da çalıştırıldı. Tarama aralığı 10-30, adım boyutu 0,02 ve tarama hızı 0,4 / dakika olarak seçilmiştir.

Fındıkkabuğu partiküllerinin kristallik indeksi (CrI), Segal ampirik yöntemi (Meghana vd., 2018; Joonobi vd., 2010; Nam vd., 2016) Denklem (1) kullanılarak belirlenmiştir.

$$CrI = (I_{002} - I_{am}) \times 100 / I_{002} \quad (1)$$

Burada; I₀₀₂, 002 kristalin pik'in maksimum noktası ve I_{am}, 101 ve 002 pikler arasındaki en düşük noktadır.

Taramalı elektron mikroskopisi görüntüleri, JSM-5910 marka cihaz kullanılarak ve test edilmiş numunelerin kırık yüzeylerinin altın ile kaplanmasından sonra elde edilmiştir. SEM analizleri, Fındıkkabuğu partikülleri /PMMA kompozitlerin mikrografilerinin detaylı incelemesi ile yürütülmüştür.

2.2.2. Üç nokta eğme testi (Tree point bending test)

Üç nokta eğme testleri Ege Üniversitesi merkezi laboratuvarında çekme makinesinde gerçekleştirilmiştir (AUTOGRAPH AG-IS-100 KN) (Şekil 3). Çekme makinesinden elde edilen kuvvet ve uzama değerleri bilgisayara

aktarılırken, çatlak ağzı açılma miktarı yüksek hızlı kamera kaydedicisi ile ölçülmüştür. Testler oda sıcaklığında ve 1mm/dk sabit hızla gerçekleştirilmiştir.

σ_F ve E_f değerleri aşağıdaki formüller kullanılarak hesaplanmıştır (Atkins ve Mai, 1988):

$$\sigma_F = \frac{3P_m S}{2WD^2} \quad (2)$$

$$E_f = \frac{P_m S^3}{4WDe} \quad (3)$$

Burada, P_m çatlak uzamasındaki yük, S , destek açıklığı, D , numune kalınlığı, e , çatlak açılması, W , numune genişliği ve a , çatlak uzunluğudur.

2.2.3. Kritik gerilme şiddet faktörünün hesaplanması (Calculation of the critical stress intensity factor)

Kırılma testleri üç nokta eğme aparatı yardımı ile tek kenardan başlangıç çentiği açılmış numuneleri üzerinde gerçekleştirilmiştir (Şekil 3). Çalışma, Ege Üniversitesi Araştırma Test ve Analiz Laboratuvarında Autograph marka cihazla, destekler arası mesafe 56mm ve 0,1 mm/dak yer değiştirme hızında gerçekleştirildi. Testler sırasında yük ve çatlak açılma miktarı kaydedildi. Çatlak uzunluğunun, (a) standarda göre parça genişliğine, (w) oranı (a/W) 0,45 ile 0,55 olması koşuluna göre; a/W 0,5 olarak seçilmiştir.

Standart'a göre bir numunenin kırılma tokluğu (KIC) aşağıdaki Denklem (4) yardımı ile (ASTM D5045-99).

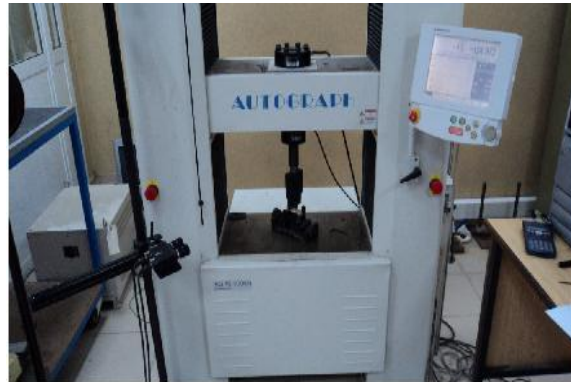
$$K_{IC} = \left(\frac{P_f}{B\sqrt{W}} \right) f \left(\frac{a}{W} \right) \quad (4)$$

Burada P_f üç nokta eğilme testindeki maksimum yük, B numunelerin kalınlığı, W numune genişliği, ve a başlangıç çatlak uzunluğu, $f(a/W)$ örneğin ilk derinlik oranına göre düzeltme sabitidir ve aşağıdaki denklemlerle elde edilir (Chuang vd.2023).

$f(a/W)$ örneğin ilk derinlik oranına göre düzeltme sabitidir ve aşağıdaki denklemlerle elde edilir (Chuang vd.2023).

$$f(x) = \frac{6\sqrt{x}(1,99-x(1-x)(2,15-3,93x+2,7x^2))}{(1+2x)(\sqrt[3]{1-x})} \quad (5)$$

$x = a/w$ çatlak uzunluğunun, numune genişliğine oranıdır.



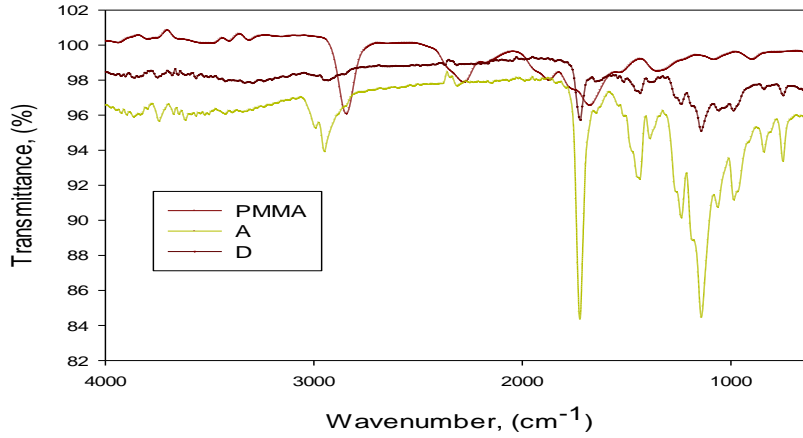
Şekil 3. Eğilme ve Kırılma Testi Düzenegi (Flexural and Fracture Test Assembly)

2.2.4. Darbe dayanımı (Impact resistance)

Darbe dayanımı testlerinde kullanılacak numuneler ISO 180 Type 1A normundaki ölçülere (80x10x4 mm) uygun olarak işlendi. Darbe numunelerine çentik uç radüsü 0,25 mm olan çentikler açıldı. Testler 5,4 kJ'lük sarkaç kullanılarak, Izod yöntemiyle Zwick B5113 model darbe testi cihazında gerçekleştirildi.

3. Bulgular ve Tartışma (Results and Discussion)

3.1. FTIR Analizleri (FTIR Analyses)



Şekil 4. Maksimum 50 ve 425 μm Partikül Büyüklüğünde ve %20 FKU/PMMA Kompozitin FTIR Görüntüsü
(FTIR Image of 20% PKU/PMMA Composite with Maximum Particle Size of 50 and 425 μm)

Şekil 4'te saf PMMA ve 0-50 μm ve 250-425 μm takviyeli kompozitlerin FTIR grafiği verilmiştir. Saf PMMA'nın 1.150 cm^{-1} 'den 1.250 cm^{-1} 'e kadar olan bölgede belirgin bir soğurma bandının olduğu görülebilir. 1,388 cm^{-1} ve 754 cm^{-1} 'deki iki bant C-O-C gerilme titreşimlerine atfedilebilir. 987 cm^{-1} 'deki bant, 1,080 cm^{-1} ve 845 cm^{-1} 'deki bantlarla birlikte metil grubu titreşimleridir ve PMMA'nın karakteristik soğurma titreşimidir. 1.732 cm^{-1} 'deki bant akrilat karboksil varlığını göstermektedir (Duan vd., 2008). 2,997 cm^{-1} ve 2,850 cm^{-1} 'de iki bant sırasıyla -CH₃'ün ve CH₂'nin C-H bağı gerilme titreşimlerine atanabilir. Ayrıca 3,551 cm^{-1} ve 1,524 cm^{-1} 'de iki zayıf soğurma bandı vardır ve bunlar sırasıyla -OH grubunun gerilmesine ve fiziksel olarak emilen nemin bükülme titreşimleri ile ilişkilendirilebilir. 250-425 μm takviye için 3439 cm^{-1} de ve 0-50 μm 3295 cm^{-1} de gözlemlenen pik O-H gruplarının varlığını göstermektedir. Bu pik'in fındık kabuğunun içerdiği nem veya alkol ya da fenol gruplarından kaynaklandığı düşünülmektedir (Özveren, 2012).

Kompozitin FTIR incelemesi sonucunda fındıkkabuğunun kompozit içerisindeki varlığı açıkça teyit edilebilir. Fındık kabuğunun varlığı kimyasal kompozisyona bağlı olarak bazı farklı pikleri ortaya çıkardığı gibi PMMA'nın bazı piklerinde de küçük kaymaların olduğu gözlenmektedir. Bu da iki malzeme arasında zayıf da olsa bir etkileşimin varlığını ortaya koymaktadır. Ayrıca maksimum 50 μm partikül boyutuna sahip kompozitler ile 425 μm partikül ile takviyeli kompozitlerin FTIR grafikleri arasında da bazı piklerin kaydığı gözlenmiştir.

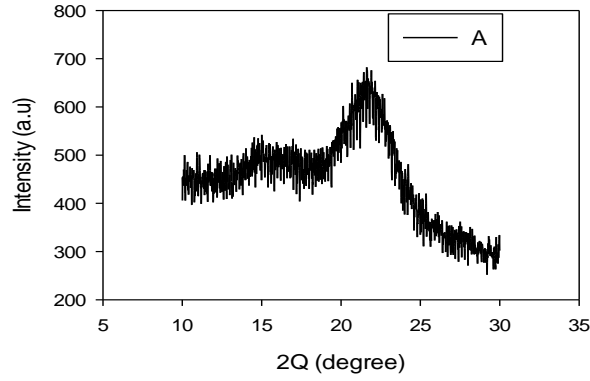
Bu kimyasal etkileşimlerin, polimer matris ile takviye arasındaki ara yüzey yapışmasının iyileştirilmesine olumlu katkı yaptığı yapılan çalışmalarda teyit edilmiştir (Trika vd., 2016).

3.2. Fındıkkabuğu Partikülü X-Işını Kırınımı Analizi (X-ray Diffraction Analysis of Hazelnut Shell Particle)

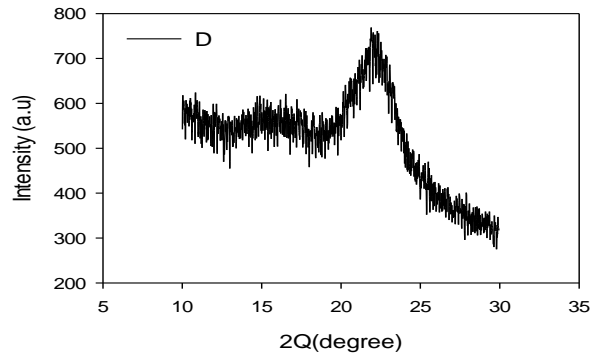
Fındıkkabuğunun tane büyüklüğü arttığında yapıda az miktarda da olsa yumuşak materyal (fındıkkabuğunun içinde bulunan meyve yatağındaki yumuşak materyal) bulunmaktadır. Bu nedenle az da olsa farklılık arz eden bu partiküllerin kristalinite oranlarını ve bunun kompozitin mekanik özelliklerine etkisini belirlemek amacı ile bu test gerçekleştirilmiştir.

Fındıkkabuğu partikülü içerisindeki selülozun tipik kristal kafesine ait X-ışını kırınım desenleri Şekil 5 ve 6'da verildi. Selüloz elyafa ait ana desenlerin iki teta değerleri sırasıyla 16 ve 21.8 dir ve bu desenler (101) ve (002) düzlemlerine karşılık gelir. Pik (002), selüloza ait en büyük kristalin zirvesidir. Fındık kabuğu partikülünün kristalinite indeksinin tane büyüklüğüne bağlı olarak çok küçük değişimler gösterdiği, 0-50 tane büyüklüğüne sahip partikülünün kristalinite indeksinin %33,8 (şekil 5 ve 6) 250-425 tane büyüklüğünde ise % 31,2 olduğu ortaya konulmuştur. Yapılan bazı çalışmalarda, sisal, keten, kenevir, kenaf gibi selüloz elyaf çeşitlerinin kristalinite indeksini ölçmek için aynı yöntemin kullanıldığı görülmüştür (Adekoya vd., 2022).

Selülozik takviye içeren kompozitlerde selülozun kristalin oranının mekanik özellikleri etkilediği bildirilmiştir (Frone, 2016). Bulgular, dolgu boyutuna göre kristal oranının %3 oranında değiştiğini göstermiştir.



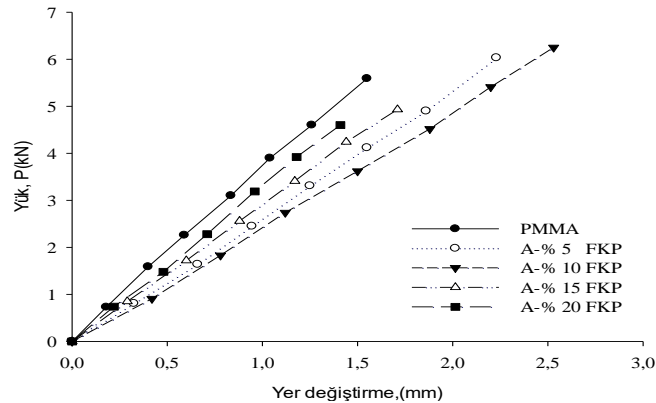
Şekil 5. 0-50 µm Boyutunda Fındıkkabuğu Partikülüne Ait X-ışınımı Paterni
(X-ray Pattern of 0-50 µm Size Hazelnut Shell Particle)



Şekil 6. 250-425 µm Boyuta Sahip Fındıkkabuğu Partikülüne ait X-ışınımı Paterni
(X-ray Pattern of 250-425 µm Size Hazelnut Shell Particle)

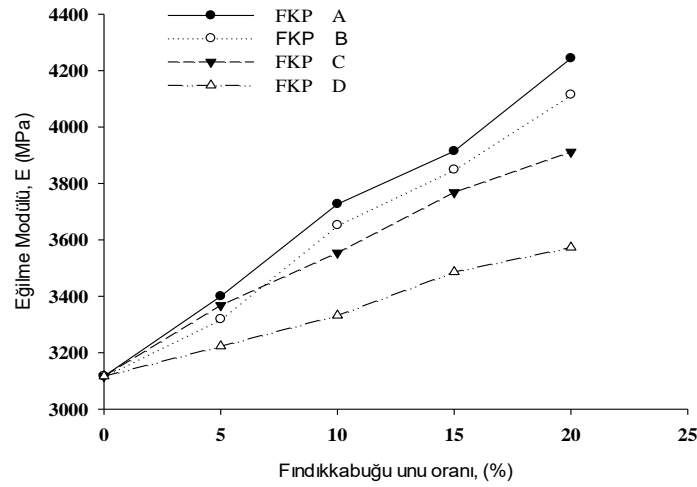
3.3. Eğilme Dayanımı ve Modülü (Bending Strength and Modulus)

0-50 µm büyüklüğe sahip fındıkkabuğu partikülü dolgulu kompozitlere ait üç nokta eğme testi yük-yer değiştirme grafiği Şek. 7'de verilmiştir. Kullanılan dolgu miktarına bağlı olarak eğilme kuvveti artmakta ve ağırlıkça %10 dolgulu kompozitlerde saf termosetin dayanımı ile karşılaştırıldığında %12 değerine ulaşmaktadır. Bu orandan sonra eğilme kuvvetinde azalma meydana gelmiş ve ağırlıkça %20 dolgulu kompozitlerde saf malzemenin eğilme kuvveti değerlerine göre %18' olarak gerçekleşmiştir. 150 µm dolgulu kompozitlerde artış %8 olurken maksimum orandaki azalma %17 olarak gözlemlenmiştir. 250 ve 425 µm dolgulu kompozitlerde eğilme kuvvetinde düşüş gözlemlendi. Bu kompozitlerin, saf malzemeye göre eğilme kuvvetlerindeki düşüşler sırasıyla %11ve %18 olarak gerçekleşmiştir.



Şekil 7. Saf PMMA ve 50 µm Dolgulu Kompozitlerin Yük-Yer Değiştirme Grafiği
(Load-Displacement Graph of Neat PMMA and 50 µm Filled Composites)

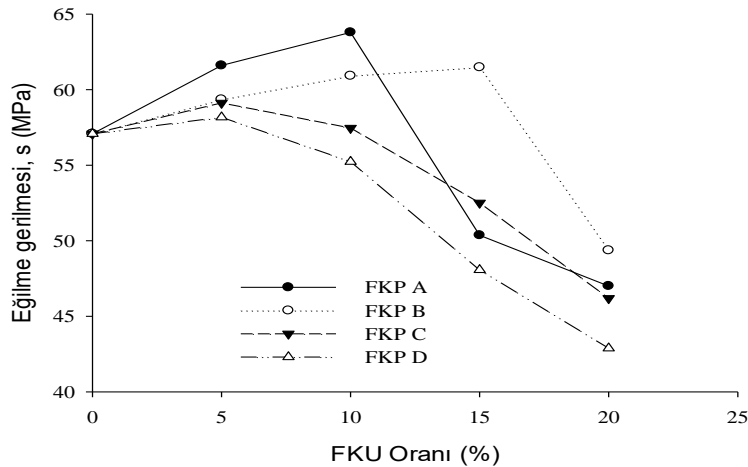
Dolgu boyutu ve dolgu oranının değişimi ile kompozitlerin eğilme modüllerinin değişimi Şekil 8'de ve nihai gerilmeler Şekil 9'da grafik halinde sunulmuştur. Kompozitlerin maksimum partikül boyutuna göre (50, 150, 250, 425 μm) eğilme modülündeki artış oranları sırası ile %36, %32, %26 ve %15 olarak gerçekleşmiştir. Kompozitlerin dolgu oranı arttıkça modülün de buna bağlı olarak arttığı gözlemlenmiştir. Yapılan çalışmalarda, polimer kompozitlerde dolgu miktarının artması ile modülün arttığı gösterildi (Kumar vd., 2014).



Şekil 8. Eğilme Modülünün Fındıkkabuğu Partikülü Oranına Göre Değişimi
(The Change of the Flexural Modulus of Hazelnut particle according to hazelnut flour content)

Kompozitlerin eğilme gerilmesi %5 katkı oranında tüm dolgu boyutlarında (50,150,250,425 μm) sırasıyla %8, %5, %4 ve %3 artmıştır. %10 takviyeli kompozitlerde gerilme ilk üç dolgu boyutunda sırasıyla %12, %7, %1 artmış %20 takviyeli kompozitlerde %3 azalmıştır. 150 μm takviye boyutuna ve %15 katkı oranına sahip kompozit numunelerde %9 artış gerçekleşmiştir. Diğer dolgu boyutlarında (50, 250, 425 μm) sırasıyla %12, %8, %16 oranında düşüş gözlemlenmiştir. %20 katkı oranına sahip kompozitlerde tüm boyutlarda düşüş gerçekleşmiş ve düşüş oranları sırasıyla %18, %13, %19, %25'tir. Bu sonuç, partikül boyutu 49-275 μm aralığında bulunan kompozitlerde, eğilme dayanımı ve eğilme modülünün arttığını rapor eden çalışmalar ile paralellik arz eder (Kuan vd., 2021).

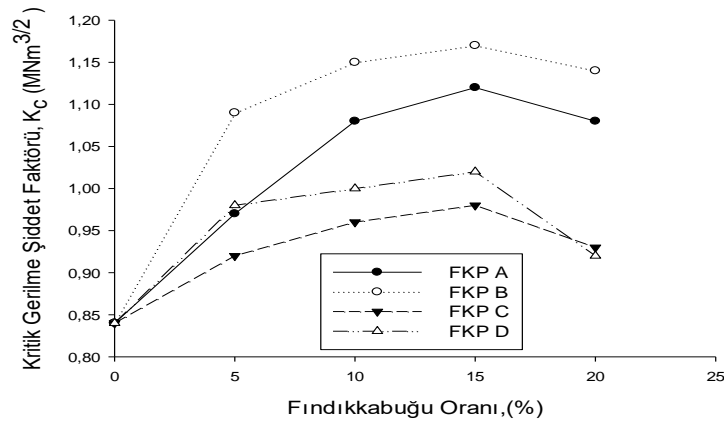
Burada en dikkate değer sonuç 0-50 μm partikül oranına sahip kompozitlerde eğilme gerilmelerindeki düşüşün 50-150 μm boyutlu kompozitlerden daha hızlı olmasıdır. Bu düşüşün nedeni, katkı miktarı arttıkça matrisin dolguyu yeterince ıslatamaması ve buna bağlı olarak yeterli mukavemete sahip bağlantının oluşmaması olarak izah edilebilir.



Şekil 9. Eğilme Gerilmesinin Fındıkkabuğu Partikülü Oranına Göre Değişimi
(Variation of Bending Stress According to Hazelnut Particle Content)

3.4. Kritik Gerilme Şiddeti Faktörü (Critical Stress Intensity Factor)

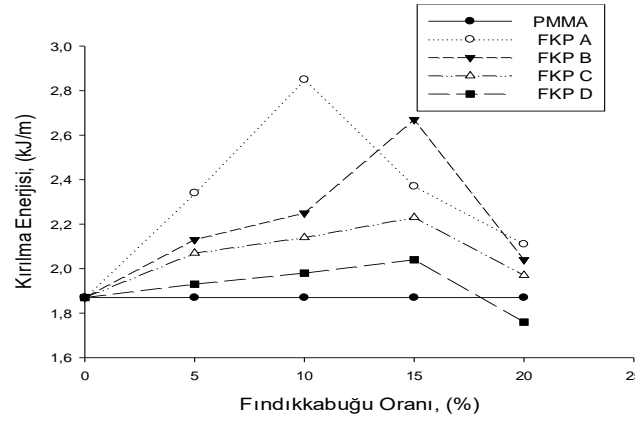
Kompozit malzemenin kritik gerilme şiddeti faktörü Denklem (4) kullanılarak hesaplanmış ve sonuçlar Şekil 10'da grafik halinde verilmiştir. 50 µm boyutunda dolguya sahip %5, %10, %15, %20 takviyeli kompozitlerin Kritik gerilme şiddeti faktörü değerleri saf PMMA göre sırasıyla %12, %21, %33, %29 oranlarında artış göstermiştir. 150 µm dolgulu kompozitlerde Kritik gerilme şiddeti faktörü değerlerinde aynı sıraya göre %30, %37, %39, %36 artış kaydedilmiştir. 250 µm Takviyeye sahip kompozitlerde de aynı orana göre artışlar %10, %14, %17, %11 şeklinde gerçekleşmiştir. 425 µm boyutunda fındıkkabuğu takviyeli kompozitlerin Kritik gerilme şiddeti faktörü değerlerindeki artışlar aynı oranlara göre %17, %19, %21, %10 olarak kaydedilmiştir. Kritik gerilme şiddeti faktörü (K_{IC}) dolgu miktarına bağlı olarak tüm kompozitlerde %15 takviye miktarında maksimuma ulaşmıştır. Bu sonuçlar, parçacık takviyeli polimer kompozitlerin kırılma tokluğunun, parçacıkların boyutundan etkilendiğini ortaya koymaktadır. Kompozitler ile yapılan ve gerilme yoğunluğu yaklaşımının kullanıldığı testlerde, yapılan çalışmaya paralellik arz eder şekilde küçük boyuta sahip parçacıkların kırılma tokluğunu arttırdığı rapor edilmiştir (Lauke, 2008).



Şekil 10. Kritik Gerilme Şiddeti Faktörünün Fındıkkabuğu Partikülü Oranı ile Değişimi (Change of Critical Stress Intensity Factor According to Hazelnut Shell Particle Content)

3.5. Darbe Testi (Impact Test)

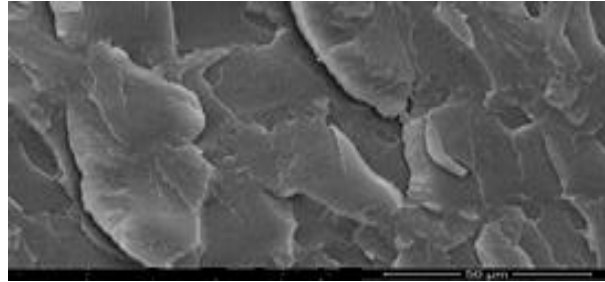
Fındıkkabuğu/PMMA kompozitlerde dolgu boyutu ve dolgu oranının değişimi ile darbe enerjilerinde meydana gelen değişim Şek.11'de verilmiştir. Değişimler farklı olmakla birlikte maksimum 50-425 µm boyutundaki dolgular kullanılarak elde edilen kompozitlerin kırılma tokluğu davranışı ile darbe dayanımı davranışının paralellik arz ettiği görülmüştür. 0-50 µm boyutunda ve %5, %10, %15, %20 takviye oranına sahip kompozitlerin darbe testlerinde artış oranları sırasıyla %25, %52, %26 ve %12 olmuştur. 150 µm boyutunda fındıkkabuğu takviyeli ve %5-%20 dolgu boyutuna sahip numunelerin artış oranları sırasıyla %13, %20, %42, %9 olarak kaydedilmiştir. 250 partikül boyutuna sahip kompozitlerde artışlar sırasıyla %11, %14, %19 ve %5 olarak gerçekleşmiştir. 425 µm dolgu boyutuna sahip kompozitlerde %5-%15 artışlar aynı sıraya göre %3, %5, %9 iken %20 takviyeli kompozitlerde %6 düşüş gerçekleşmiştir. Bu sonuç, parçacık takviyeli kompozitlerde, dolgu miktarının belirli bir oranından sonra darbe dayanımını düşürdüğünü teyit etmiştir (Bel vd., 2018).



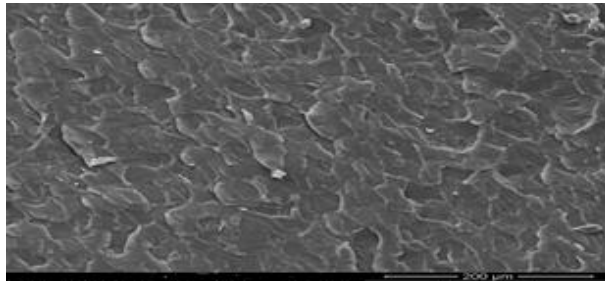
Şekil 11. Darbe Dayanımının Fındıkkabuğu Partikülü Oranına Göre Değişimi
(Change of Impact Strength With Respect to Hazelnut Shell Particle Content)

3.6. Morfoloji (Morphology)

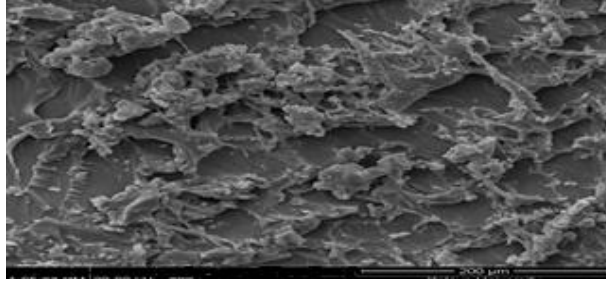
Saf PMMA ve FKU 0-50 μm dolgu boyutuna sahip %5, %10, %15, %20 FKU dolgulu PMMA kompozit numunelerin kırık yüzeylerine ait SEM mikro fotoğrafları sırasıyla, Şekil 12, Şekil 13, Şekil 14, Şekil 15 ve Şekil 16'da görülmektedir. Yüzeydeki kırılma izleri incelendiğinde, saf haldeki PMMA'nın kırılma esnasında plastik deformasyon göstermediği kolaylıkla anlaşılabilir (Şekil 12). %5 FKU katkılı PMMA kompozit numunenin de kırık yüzey görüntüsünden kırılmanın gevrek sayılabilecek bir karakterde olduğu, fakat saf PMMA'a göre biraz daha sünek bir davranış sergilediği söylenebilir (Şekil 13). %10 FKU katkılı PMMA kompozitin kırık yüzey görüntüsünün daha sünek kırılma biçiminde olduğu, buna bağlı olarak hasara uğrarken en yüksek enerji absorpsiyonuna sahip olduğu ifade edilebilir (Şekil 14). %15 FKU katkılı PMMA kompozitin kırık yüzey görüntüsü, sünekliğin %10 katkılı numunelere göre azaldığını ve gevrek bir davranışın etkin olduğunu doğrulamaktadır (Şekil 15). %20 FKU katkılı PMMA kompozitin kırık yüzey görüntüsünden %15'lik orana göre daha gevrek bir karakter kazandığı görülmektedir. Bunun nedeni %20 takviyeli kompozitlerde dolgunun topaklanması nedeni ile homojen dağılımın bozulmasıdır (Şekil 16).



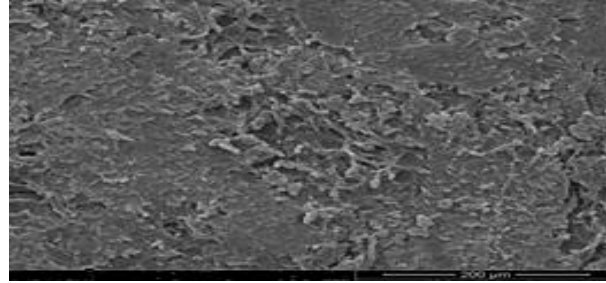
Şekil 12. Saf PMMA'nın Kırık Yüzeyinin SEM Mikrofotografı
(A Typical SEM Microphotograph of The Broken Surface of Neat PMMA)



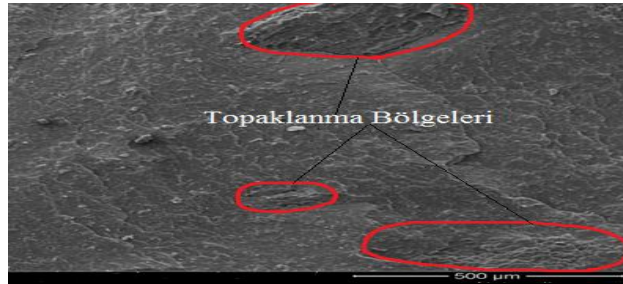
Şekil 13. 0-50 μm Boyutunda % 5 FKP Takviyeli PMMA Kompozitin Kırık Yüzeyinin Tipik SEM Mikrofotografı
(A Typical SEM Microphotograph of The Fractured Surface of 5 % HNSP (Hazelnut Shell Particle) (0-50 μm) Filled PMMA Composite)



Şekil 14. 0-50 µm Boyutunda % 10 FKP Takviyeli PMMA Kompozitin Kırık Yüzeyinin Tipik SEM Mikrofotoğrafi
(A Typical SEM Microphotograph of The Fractured Surface of 10 % HNSP (50-150 µm) Filled PMMA Composite)



Şekil.15. 150-250 µm Boyutunda % 15 FKP Takviyeli PMMA Kompozitin Kırık Yüzeyinin Tipik SEM Mikrofotoğrafi
(A Typical SEM Microphotograph of The Fractured Surface of 15 % HNSP (150-250 µm) Filled PMMA Composite)



Şekil 16. 250-425 µm Boyutunda % 20 FKP Takviyeli PMMA Kompozitin Kırık Yüzeyinin Tipik SEM Mikrofotoğrafi
(A Typical SEM Microphotograph of The Fractured Surface of 20 % (250-425 µm) Filled PMMA Composite)

4. Sonuçlar (Conclusions)

Çalışmada fındikkabuğu partikülleri kullanılarak, yapısal uygulamalarda kullanılacak kompozit malzeme üretimi başarı ile gerçekleştirilmiştir.

Polimetilmetakrilat/Fındikkabuğu kompozitlerde dolgu oranı arttıkça, eğilme modülünde artış, eğilme gerilmesi, kırılma tokluğu ve darbe dayanımı değerlerinde belirli oranlara kadar artış ve daha sonra düşüş gözlenmiştir.

Dört farklı dolgu boyutu kullanılarak oluşturulan kompozitlerden 0-50 µm boyutunda fındikkabuğu partikülü ilave edilerek oluşturulan kompozitler, mekanik açıdan daha üstün performans göstermiştir.

Yapılan çalışma ile fındikkabuğu partikülünün düşük tane boyutlarında, kompozitlerde doğal bir takviye malzemesi olarak kullanılabilmesi ve böylece inşaat gibi bazı alanlardaki çevre dostu uygulamalarda bu kompozitlerden yararlanılabileceği düşünülmektedir.

Ayrıca atık olarak kullanılan bu materyalin, ekonomik bir ürüne dönüştürülerek yeni bir üretim alanı oluşturulması, sosyo-ekonomik katkı sağlamanın yanında çevre dostu malzemelerin gelişimi ve kullanımı açısından da önemli olduğu düşünülmektedir.

Teşekkür (Acknowledgement)

Çalışmaya yaptığı katkıdan dolayı Giresun Üniversitesi B.A.P ofisi (FEN-BAP-140411) ve tüm emeği geçenlere teşekkürlerimizi sunarız.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

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

Kaynaklar (References)

- Adekoya, M.A., Liu, S., Oluyamo, S.S., Oyeleye, O.T., Ogundare, R.T., 2022. Influence of size classifications on the crystallinity index of Albizia gummifera cellulose, 8 (12) <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e12019>
- Andrew, J.J., Dhakal, H.N., 2022. Sustainable biobased composites for advanced applications: recent trends and future opportunities – A critical review *Composites Part C*: <https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2021.100220>
- Astm D5045-99 Standard Test Methods for Plane-Strain Fracture Toughness and Strain Energy Release Rate of Plastic Materials Copyright ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States.
- Atkins A.G., & Mai Y.W., 1988. Elastic and Plastic fracture Chichester, Ellis Horwood/John Wiley
- Balart, J.F., Fombuena, V., Fenollar, O., Boronat, T., Sanchez-Nache, L., 2016. Processing and characterization of high environmental efficiency composites based on PLA and hazelnut shell flour (HSF) with biobased plasticizers derived from epoxidized linseed oil (ELO), *Composites Part B*, 86, 168-177. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.09.063>
- Bel, T., Arslan, C., Baydoğan, N., 2018. Production of PMMA/ Microsphere/ Montmorillonit nanocomposite, PMMA/ Microsphere/ Halloysite nanocomposite by atom transfer radical polymerization technique and comparison of mechanical properties, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 18 (1). doi: 10.17341/gazimmfd.416525
- Chuang, P.C., Chao, C.Y., Yang, M., Tsai, J.L., 2023. Investigating fracture toughness of graphene epoxy nanocomposites using single edge notched bending specimens, *Journal of Mechanics*, 39, 105-112. <https://doi.org/10.1093/jom/ufad007>
- Çöpür, Y., Güler, C., Taşcıoğlu, A. 2008. Incorporation of hazelnut shell and husk in MDF production, *Short Communication, Bioresource Technology*, 99, 7402-7406. doi:10.1016/j.biortech.2008.01.021
- Frone, A.N., Panaitescu, D.M., Chiulan, I., Nicolae, C.A., Vuluga, Z., Vitelaru, C., Damian, C.M., 2016. The effect of cellulose nanofibers on the crystallinity and nanostructure of poly(lactic acid) composites, *Journal of Material Science*, 51, 9771-9791. doi 10.1007/s10853-016-0212-1
- Duan, G., Zhang, C., Li, A., Yang, X., Lu, L., Xin Wang, X., 2008. Preparation and Characterization of Mesoporous Zirconia Made by Using a Poly (methyl methacrylate) Template, *Nanoscale Res Lett.*, 3, 118-122. doi 10.1007/s11671-008-9123-7
- Gürü, M., Aruntaş Y., Bilici İ., Tüzün N., 2009. Processing of urea-formaldehyde based particleboard from hazelnut shell and improvement of its fire and water resistance, *Fire Material*, 33, 413-419. doi: 10.1002/fam.1011
- İslam, A. 2018 Hazelnut culture in Turkey, Review, *Akademik Ziraat Dergisi*, 7(2), 259-266. doi: <http://dx.doi.org/10.29278/azd.476665>
- Joonobi, M., Harun, J., Tahir, P. M., Zaini, L. H., Saiful Azry, S., Makinejad, M.D., 2010. Characteristic of nanofibers extracted from kenaf core, *BioResources*, 5(4), 2556-2566.
- Kaya, N., 2018. Cam elyaf ile katkılanmış tarımsal atıklar kullanılarak üretilen lif levhaların (MDF) mekanik ve fiziksel özelliklerinin incelenmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 33 (3), 905-916. doi: <http://dx.doi.org/10.17341/gummfd.42013>
- Kuan, H.T.N., Tan, M.Y., Shen, Y., Yahya, M.Y., 2021. Mechanical properties of particulate organic natural filler-reinforced polymer composite: A review, *Composites and Advanced Material*, 30: 1-17. doi: 10.1177/26349833211007502
- Kumar, R., Kumar, K., Sahoo, P., Bhowmik, S. 2014. Study of Mechanical Properties of Wood Dust Reinforced Epoxy Composite, *Procedia Materials Science*, 6, 551-556. doi: 10.1016/j.mspro.2014.07.070
- Lauke, B., Fu, Y.S., 2013. Aspects of fracture toughness modelling of particle filled polymer composites, *Composites Part B: Engineering*, 45, (1)1569-1574. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.07.021>
- Lauke, B., 2008. On the effect of particle size on fracture toughness of polymer composites, *Composites Science and Technology*, 68 (15-16), 3365-3372. doi:10.1016/j.compscitech.2008.09.011
- Meghana N. Thorat, M.N., Dastager, S.G., 2018. High yield production of cellulose by a *Komagataeibacter* PG2 strain isolated from pomegranate as a new host, *RSC Adv*, 8, 29797-29805, 29797. doi: 10.1039/c8ra05295
- Nam, S., French, A.D., Condon, B.D., Concha, M., 2016. Segal crystallinity index revisited by the simulation of X-ray diffraction patterns of cotton cellulose I β and cellulose II, *Carbohydrate Polymers* 135(4633):1-9. doi: 10.1016/j.carbpol.2015.08.035
- Özveren, U., Duygu Bozdağ N., Şahin, S., Özdoğan S., 2012. TG-MS ve FTIR Kullanılarak Fındık Kabuğunun Gazlaştırılmasının İncelenmesi, Onuncu Ulusal Kimya Mühendisliği Kongresi, 3-6 Eylül 2012, Koç Üniversitesi.

- Raju, G. U., & Kumarappa, S., 2011. Experimental study on mechanical properties of groundnut shell particle-reinforced epoxy composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 30(12), 1029-1037. <https://doi.org/10.1177/0731684411410761>
- Salasinska, K., Barczewski, M., Górny, R., Kloziński, A., 2018. Evaluation of highly filled epoxy composites modified with walnut shell waste filler, *Polymer Bulletin*, 75, 2511-2528. <https://doi.org/10.1007/s00289-017-2163-3>
- Taşdemir, H.M., Şahin, A., Karabulut, A.F., Gürü, M., 2018. Investigation of the properties of composite material produced from mint fiber added waste palm kernel, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, <https://doi.or./10.17341/gazimmfd.416504>
- Tazi, M., Erchiqui, F., Kaddami, F.H., Bouazara, M., Poaty, B., 2015. Evaluation of Mechanical Properties and Durability Performance of HDPE-Wood Composites, *AIP Conference Proceedings* 1664.
- Thirupathi, S., Mallichetty, E., Gopalan, V., Shenbaga Velu Pitchumani, S.V., 2024. Areca Fiber Reinforced Bio-Materials: A Review on Processing, Properties and Advanced Optimization Technique, *J. of Natural Fibers* Volume 21, 2024 -Issue 1. <https://doi.org/10.1080/15440478.2024.2357236>
- Trika, A., Dittmerb, J., Hassen, M.B., Arousa, M., Buloub, A., Gargouri, M., 2016. Spectroscopy Analyses of Hybrid Unsaturated Polyester Composite Reinforced by Alfa, Wool, and Thermo-Binder Fibres *Polymer Science*, 58:2, 255-264. doi: 10.1134/S0965545X16020188
- Zhang, X., Sun, Z., & Hu, X., 2014. Low temperature fracture toughness of PMMA and crack-tip conditions under flat-tipped cylindrical indenter. *Polymer Testing*, 38, 57-63. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2014.06.009>