

Ayçiçeği Kabuğu Takviyeli Biyo-Epoksi Matrisli Çevreci ve Maliyet Etkin Kompozitlerin Geliştirilmesi ve Mekanik Karakterizasyonu

Development and Mechanical Characterization of Environmentally Friendly and Cost-Effective Composites with Sunflower Husk Reinforced Bio-Epoxy Matrix

Asya Nur SUNMAZ¹, Ulaş DOĞAN¹, Alaeddin Burak IREZ¹

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

Öz

İklim değişikliği, azalan kaynaklar ve artan hammadde maliyetleri, endüstriyi daha sürdürülebilir, uygun maliyetli ve hafif malzemeler yaratmaya itmiştir. Doğal elyaf takviyeli kompozitler bu bağlamda çelik gibi mevcut geleneksel malzemelerin yerine kullanılacak alternatiflerdir. Ayçiçeği kabuğu (SH), diğer birçok doğal elyafın yanı sıra, tarımsal atık olarak kolayca erişilebilir ve avantajlı malzeme özelliklerine sahiptir. Bu çalışmada, biyo-epoksi matrisi ile ayçiçeği kabukları, toz haline getirildikten sonra karıştırılarak kompozitler imal edilmiş ve sonrasında mekanik özellikleri tespit edilmiştir. Ayrıca, ayçiçeği kabuklarının NaOH ile yüzey işlemine tabi tutulmasının mekanik performansa etkisi de bu çalışma kapsamında incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, SH takviyesi kompozitlerin çekme dayanımını ve kopma uzamasını düşürürken, elastisite modülünü arttırmıştır. Dolgu elemanı olan ayçiçeği kabuğunun NaOH ile muamele edilmesi mekanik özelliklerde iyileşme sağlamıştır. Mekanik özellik tespiti adına gerçekleştirilen çekme testi sonrasında oluşan kırık yüzeyleri taramalı elektron mikroskobu ile incelenmiş ve NaOH ile yüzey işlemine tabi tutulmamış olan numunelerde matris elyaf ara yüzey problemleri gözlenmiştir. Ayrıca liflerin dekohezyonu da ayrı bir hasar mekanizması olarak karşımıza çıkmıştır. Sonuçlar değerlendirildiğinde, bu tip çevreci ve maliyet etkin kompozitler otomotiv sektöründe yapısal olmayan, parçaların üretiminde önemli tercih potansiyeli sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Sürdürülebilirlik, Doğal elyaf takviyeli kompozitler, Biyo-bozunabilir malzemeler, Hasar mekanizmaları

Abstract

Climate change, dwindling resources and rising raw material costs have pushed the industry to create more sustainable, cost-effective and lightweight materials. In this context, natural fiber composites are alternatives that can be used instead of existing traditional materials such as steel. Sunflower husk (SH), along with many other natural fibers, is easily accessible as agricultural waste and has advantageous material properties. In this study, composites were manufactured by mixing bio-epoxy matrix and sunflower husks after being grinded into powder, and then their mechanical properties were determined. Additionally, the effect of surface treatment of sunflower husks with NaOH on mechanical performance was also examined within the scope of this study. According to the results, SH reinforcement decreased the tensile strength and elongation at break of the composites, while increasing the elasticity modulus. Treating the sunflower husk, which serves as the filler component, with NaOH has improved the mechanical properties. After conducting the tensile tests in order to determine the mechanical properties, the fractured surfaces were examined using scanning electron microscopy, revealing matrix-fiber interface issues in the samples that were not subjected to NaOH surface treatment. In addition, decohesion of fibers emerged as a separate damage mechanism. When the results are evaluated, this type of environmentally friendly and cost-effective composites can be preferred in the production of non-structural parts in the automotive industry.

Keywords: Sustainability, Natural fiber reinforced composites, Biodegradable materials, Failure mechanisms

I. GİRİŞ

Günümüz dünyasının en önemli problemlerinden birisi küresel iklim değişikliğidir ve bu probleme çözüm olarak Birleşmiş Milletler Sürdürülebilir Kalkınma Hedeflerini yayımlamıştır. Bu hedefler, iklim değişikliğini acil olarak ele alma ve dünyamız için ortak bir eylem planı oluşturmayı amaçlamaktadır [1]. Bu eylem planının imalat sektörü ayağındaki iki temel aksiyon eko-dönüşüm ve mevcut sistemlerin, komponentlerin hafifletilmesidir. Sürdürülebilir, uygun maliyetli ve toksik olmayan alternatif malzemelerin mevcut sistemlere entegrasyonu, eko-dönüşümün temel yol haritasıdır. Öte yandan hafifletme ise toplam kütlenin azaltılıp enerji tüketimini düşürerek daha verimli sistemler geliştirilmesine olanak sağlar [2, 3]. Hafifletmenin önemini

vurgulamak için, ortalama bir aracın ağırlığında 100 kilogramlık bir azalmanın, yakıt tüketiminde 100 kilometrede yaklaşık 0,4 litrelik bir azalmaya ve CO₂ emisyonlarında kilometre başına yaklaşık 10 gramlık bir düşüşe imkân sağladığını belirtmek gerekir [4]. Hafifletmede temelde iki temel strateji izlenmektedir. Bunlardan birincisi, bileşenin belirli bölgesindeki yük taşımayan unsurların kaldırıldığı bir tasarım güncellenmesi iken ikinci yöntem ise çelik gibi ağır malzemelerin yerine daha hafif alternatif malzemelerin kullanılmasıdır [5]. Otomotiv ve havacılık endüstrilerinde düşük yoğunluğa sahip olması nedeniyle ve yüksek enerji absorbe etme kabiliyetine sahip olduğundan ponza takviyeli sintatik köpük metallerin kullanıldığı görülmüştür [6]. Bunun yanı sıra eklemeli imalat teknolojilerinin gelişmesi farklı tasarım güncellemelerine olanak sağlamıştır. Döküm ve talaşlı imalatta bulunan geometrik sınırların ötesinde üretimi mümkün kılan ve atık malzeme miktarını azaltan eklemeli imalat teknolojileri sayesinde, tasarlanan parçaların gerekli kısımlarında malzeme olmasını sağlayan, bal peteği şekline sahip boşluklu tasarımlar görülmüştür. Eklemeli imalat, bu gibi gözenekli tasarımların imal edilmesine olanak sağlarken aynı zamanda mekanik özellikler bakımından rekabetçi ürünlerin üretilmesini mümkün kılmaktadır [7-10]. Ancak bu yöntemler mevcut teknolojik durumda, yüksek üretim hacimlerinin görüldüğü otomotiv sektöründe zaman-maliyet açısından dezavantajlı kalmaktadır.

Bu bağlamda doğa bizlere, endüstrinin yeni parçaların üretiminde gözettiği hafiflik, sürdürülebilirlik isteklerini karşılayan hafif ama mukavim birçok malzeme seçeneği sunmaktadır. Bu seçenekler bitkilerden, hayvanlardan ya da doğal minerallerden elde edilen malzemeleri kapsamaktadır. Bu doğal kaynaklar polimer matrislerle karıştırılarak doğal elyaf takviyeli kompozitler üretilmektedir [11-18].

Bitki bazlı doğal elyaflara eğilecek olursak, geleneksel elyaflar bitkilerin yaprakları, tohumları, meyveleri, kabukları ve köklerinden elde edilebilmektedir. Bu elyafların temel yapıtaşları, selüloz, hemiselüloz ve lignin içermektedir. Lignin bitkide yerçekimi ve rüzgâr gibi dış kuvvetlere karşı mukavemet sağlarken hemiselüloz ise tüm elemanlar arasında uyum sağlayan bir ortam rolü oynamaktadır [19]. Bahsi geçen bu doğal elyafların doğada bol miktarda bulunması, biyo-çözünürlüğü, kenevir gibi bazı türlerinin yüksek mekanik özelliklere sahip olması şeklinde avantajları varken nem tutması ve tutuşmaya zafiyet gösterme gibi dezavantajları da mevcuttur [20-22]. Bu elyafların avantajları göz önünde bulundurulduğunda ve dezavantajlarına yönelik önlemler alındığında, bu malzemelerden üretilen yeni komponentlerin otomotiv sektöründe kullanılması şeklinde önemli bir trend gözlemlenmektedir. Özellikle, son yıllarda tarım alanında temel işlevlerini yerine getirdikten sonra geriye kalan atıklar polimer matrislerle karıştırılarak

birçok yeni kompozit malzeme elde edilmektedir. Bu yeni tarım bazlı kompozitlerin, araçların iç kısımda yer alan, paneller, konsollar, kapı ve koltuk tutacaklarında, aracın dışında ise ön ve arka tamponlarda ve ses yalıtımı için gerekli paneller gibi birçok yerde kullanıldığı görülmektedir. Tablo 1 farklı otomotiv firmalarının araçların çeşitli kısımlarında istifade ettiği doğal elyaf takviyeli kompozit bazlı komponentleri göstermektedir.

Tablo 1. Doğal elyaf takviyeli kompozitlerden üretilen otomobil komponentleri [5]

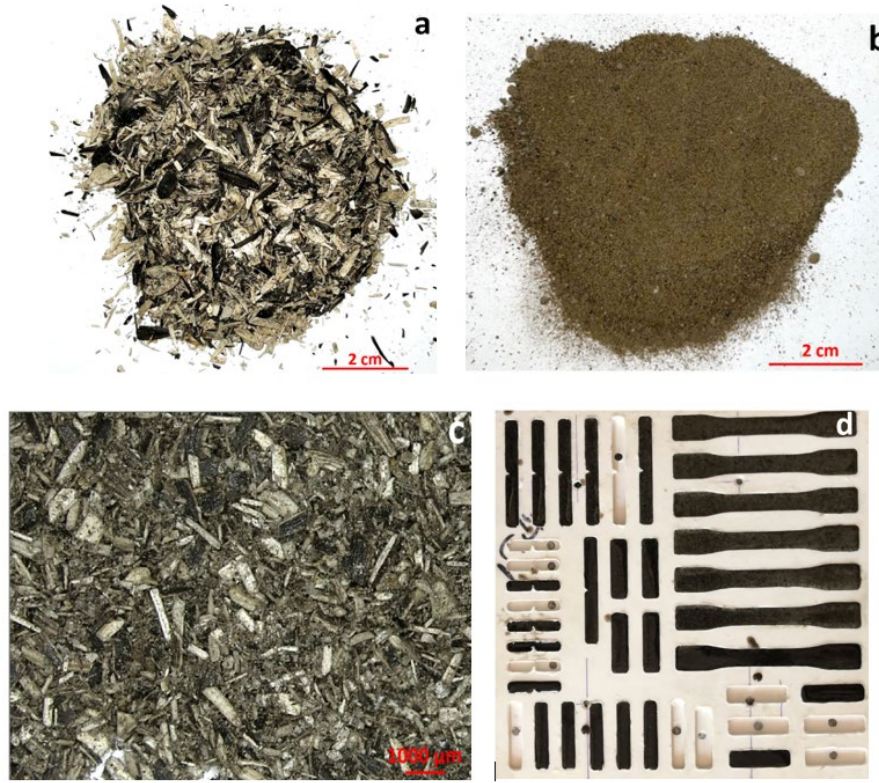
Otomobil Firması	Model/Komponent
AUDI	A3, A4, A4 Avant, A6, A8, Roadster, Coupe Koltuk arkalıkları, yan ve arka kapı panelleri, bagaj kaplaması, yedek lastik muhafazası
BMW	3, 5, 7 serileri kapı panelleri, tavan döşemesi paneli, bagaj kaplaması, koltuk arkalıkları
FORD	Mondeo CD 162, Focus kapı panelleri, Bpillar, bagaj kaplaması
CHRYSLER	Kapı paneli, ön cam gösterge paneli, yan sütun kapak paneli
OPEL	Astra, Vectra, Zafira Tavan döşemesi paneli, yan sütun kapağı paneli
ROVER	Rover 2000 ve diğerleri yalıtım, arka depolama rafı/paneli
SAAB	Kapı panelleri
SEAT	Kapı panelleri, koltuk arkalıkları
VOLKSWAGEN	Golf A4, Passat Variant, Bora Kapı paneli, koltuk arkalığı, bagaj kapağı paneli, bagaj astarı

Yukarıda da bahsedildiği üzere tarım atığı bazlı doğal elyaflardan pirinç çeltiği, buğday samanı, mısır koçanı kabuğu ve ayçiçeği çekirdeği kabuğu en sık olarak karşımıza çıkmaktadır [23]. Bunlar arasında ayçiçeği kabuğuna daha yakından bakarsak, ayçiçeği ağırlıklı olarak yağı için yetiştirilmekle birlikte biyodizel üretiminde de kullanılmaktadır [24-27]. Ayçiçeği, altı kıtada yetiştirilen ve toplam üretimi 54,42 milyon ton olan bir bitkidir. Türkiye'de 728 bin hektar alanda 2

milyon ton ayçiçeği tohumu üretilmektedir [28]. Ayçiçeği üretiminin %40-65'ini oluşturan ayçiçeği kabuğu, tarımsal bir yan üründür [29]. Ayçiçeği kabuğunun geri kazanımında başlıca yöntemler, yakıt amaçlı ayçiçeği kabuğundan pelet üretimi ve kıyılmış olarak samanın yerine hayvan yeminde kullanılması karşımıza çıkmaktadır [30, 31]. Bu yöntemlerin dışında katma değerli bir ürün üretme düşüncesiyle ayçiçeği kabuğundan yeşil kompozitlerin üretilmesi ilgi çekici bir konudur ve bu alanda çeşitli çalışmalar yürütülmektedir. Bu çalışmalar arasından, Salasinska ve arkadaşları tarafından yürütülen çalışmada, ayçiçeği kabuğu (SH) takviyesi içeren polietilen bazlı kompozitler incelenmiştir [32]. Araştırmacılar, dolgu maddesinin şeklinin ve kimyasal bileşiminin üretilen kompozitlerin mekanik özellikleri üzerindeki etkisini analiz etmeyi amaçlamıştır. Araştırmacılar, ayçiçeği kabuğu ilavesinin kompozitlerin sertliğini ve çekme mukavemetini artırdığını gözlemlemişlerdir. Buna karşılık, dolgu maddelerinin eklenmesinin gevrekliği artırdığı görülmüştür. Ayrıca, dolgu maddelerinin eklenmesi kompozit malzemenin porozitesi üzerinde de bir etki yaratarak mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkilemiştir [33]. Barczewski ve arkadaşları, polipropilen bazlı ayçiçeği kabuğu (SH) takviyeli kompozitlerin mikroyapısı ve yüzey kalitesinin bir analizini yapmıştır [34]. Bulgular, SH partiküllerinin boyutu ile kompozitlerin sertliğinde gözlenen iyileşme arasında önemli bir korelasyon olduğunu ortaya koymuştur. Ayrıca, takviye boyutu ve yüksek takviye konsantrasyonuna sahip kompozitlerde gözlemlenen çekme mukavemetindeki düşüş arasında bir ilişki keşfedilmiştir [34]. Yine Barczewski ve arkadaşlarının diğer bir çalışmasında düşük özkütleli polietilen ile SH %5-20 oranlarında karıştırılmış ve mekanik karakterizasyon sonrası SH takviyesinin kompozitlerde Young modülü ve çekme dayanımını artırdığı gözlemlenmiştir [35]. Kuram'ın yaptığı bir çalışmada ise, ABS terpolimer matrisine %5 ile %20 arasında değişen oranlarda SH takviyesi sonucunda üretilen kompozitlerde çekme ve eğilmedeki elastisite modülleri artış göstermiş, öte yandan SH'lerin iç yapıda gerilme konsantrasyon bölgeleri oluşturduğu gözlemlenmiştir [36]. Karpati ve arkadaşları ise kaba taneli (2,6 mm) SH tozunu polipropilen ve düşük/yüksek özkütleli polietilen matrislerine katarak kompozit üretmişlerdir. Tüm kompozit formülasyonlarında rijitliğin arttığını öte yandan uzama kapasitelerinin düştüğünü gözlemlemişlerdir [37]. Saba ve arkadaşlarının yapmış olduğu derleme çalışmasında da yukarıda belirtilen termoplastik matrislerin dışında polyester, vinilester ve epoksi gibi termoset reçinelerin de yukarıda bahsedilen tarımsal atıklarla karıştırılmasıyla elde edilen doğal elyaf takviyeli kompozitler incelenmiştir. Termoset reçinelerin temel avantajı olarak likit formda olmaları sayesinde doğal elyaflarla karıştırılmalarının daha pratik olduğu belirtilmiştir. Öte yandan, karışım sonrası iç yapıda hava boşluklarının olmaması için vakum altında kürlenme yapılması gerektiği belirtilmiştir [38].

Barczewski ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada ayçiçeği kabuğu ile bisphenol A bazlı termoset reçineler karıştırılarak kompozitler üretilmiş ve SH takviyesi ile rijitlikte %20 ve sertlikte ise %8'lik bir artış gözlemlenmiştir [32]. Doğal elyaf takviyeli kompozitlere yönelik incelenen bir başka metot ise, takviye elemanlarının yüzey iyileştirmeye yönelik NaOH ile işleme tabi tutulmasıdır. Doğal elyaf olan SH'ler, glikoz birimlerinden oluşan bir polisakkarit olan selülozdan oluşmaktadır. Selülozun moleküler düzeninde hidroksil (OH) gruplarının varlığı, SH'lere hidrofilik bir özellik kazandırır, bu da onların neme karşı bir eğilimi olduğunu gösterir. Hidroksil gruplarının varlığı, selüloz lifleri arasında hidrojen bağının oluşmasından da sorumludur, bu da liflerin polimer matrisler içinde dağılmasında zorluklara ve sentetik kompozit matrisleriyle yetersiz uyumluluğa neden olur. Bu uyumsuzluğun giderilmesi için SH'lere alkali yüzey kimyasal işlemi yapılmaktadır. Alkali işlemi, farklı elyaf türleri için geniş bir kimyasal uygulama yelpazesinde etkili ve yaygın bir yöntemdir. Fibrilasyonun bir sonucu olarak, alkali işlemi kompozit elyaf demetinin daha ince elyaflara ayrılmasına izin verir. Dolayısıyla, elyaf çapını azalması, elyafın en-boy oranını artırır, bu da elyaf-matris ara yüzey kalitesini iyileştirerek mekanik özellikleri iyileştirmektedir. Ayrıca alkali işlemi, potansiyel reaktif bölgelerin sayısını ve elyaf hidrasyonunu arttırmaktadır [39]. Takviye elemanının değişken reçetelerde NaOH aracılığıyla alkali işleme tabi tutulmasının ardından, takviye edildiği kompozite yönelik mekanik özelliklerde iyileşme gözlenmiştir. Bu durum, takviye elemanının matris malzemesine temas ettiği yüzeyinin pürüzlülüğünün artması ve temas yüzeyinin üzerindeki parçacık ve kalıntıların büyük ölçüde ortadan kaldırılması gibi sebeplerle gerçekleşmektedir. Thamae ve arkadaşları, Agave Americana elyaflarına NaOH ile alkali işlem uygulamış ve bu işlemin kompozitin karakteristik dayanımını %30 oranında artırdığını gözlemlemiştir [40]. Goud ve arkadaşları, Roystonea regia elyafına 2 saat süre ile küttelece %5 alkali işlem uygulamış ve bu işlemin küttelece %20 elyaf içeren kompozitin çekme dayanımını %8 ve Young Modülünü %2,6 artırdığını gözlemlemiştir [41]. L. Yan, keten liflerine küttelece %5 alkali işlem uygulamış ve bu işlemin basma dayanımını %3 oranında artırdığını gözlemlerken, bu iyileştirmenin yalnızca uygulanan alkali işlem kaynaklı olduğunu, matris ve fiber arasındaki bağ kuvvetinin artması ve bağlanma ara yüzeyindeki parçacıkların temizlenmesi ile gerçekleştiğini vurgulamıştır [42].

Alandaki literatürün kapsamlı bir incelemesinden sonra, bu çalışmalarda ortak nokta çeşitli tarımsal atıkların ve oranlarının çekme mukavemeti, kopma uzaması ve elastik modül dahil olmak üzere temel mekanik özellikler üzerindeki etkisinin çeşitli araştırmacılar tarafından incelendiği görülmektedir.



Şekil 1. a) SH'lerin öğütülme öncesi hali b) SH'lerin öğütüldükten sonraki hali c) Öğütülme sonrası SH'lerin optik mikroskopla incelenmesi d) Karıştırma sonrası kalıba dökülen kurlenme öncesi durum

Ancak, yazarların incelemelerine göre, biyo-epoksi bazlı SH takviyeli tamamen biyo-bozunabilir kompozitlerin geliştirilmesine yönelik herhangi bir çalışmaya rastlanmadığı gibi, sodyum hidroksit (NaOH) ile yüzey iyileştirmesinin SH takviyeli kompozitlerin mekanik özellikleri üzerindeki etkisine ilişkin bir araştırmaya rastlanılmamıştır. Bu nedenle, bu çalışma, likit biyo-epoksi reçine ile SH'lerin karıştırılıp vakum altında kalıplama yoluyla doğal elyaf takviyeli kompozitlerin imal edilmesi ve sonrasında Shore D sertlik ve çekme testleri ile karakterize edilmesini konu almıştır. Ayrıca, mekanik karakterizasyon tamamlandıktan sonra, hasar ve toklaştırma mekanizmalarını ortaya çıkarmak için kırılan numunelerin kırılma yüzeyleri taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmiştir.

II. MATERYAL VE METOD

Bu çalışmada kullanılan ayçiçeği kabukları Sterco® Agriculture'dan temin edilmiş (Şekil 1a) ve kullanılmadan önce 24 saat süreyle 60°C sıcaklıktaki bir şartlandırma fırınında kapsamlı bir kurutma işlemine tabi tutulmuştur. Daha sonra, kurutulmuş kabuklar 3 dakika süreyle dakikada 24.000 devir hızında çalışan Lavion® marka bir öğütücü kullanılarak ince bir toz haline getirilmiştir (Şekil 1b).

Parçacık boyutu, öğütme işleminin ardından bir optik mikroskop kullanılarak belirlenmiştir (Şekil 1c).

Öğütülmüş olan SH'ler, Giriş bölümünde belirtildiği üzere NaOH içeren alkali çözeltiler ile yüzey işlemlerine tabi tutulmuştur. Bu işlem kimyasal olarak "Elyaf-OH + NaOH → Fiber-O⁻Na⁺ + H₂O" olarak gösterilir ve bu çalışmada SH'ler çözelti/elyaf oranı 20 olan, %15'lik bir NaOH çözeltisinde bir mikser ile 500 dev/dak olacak şekilde 1 saat boyunca karıştırılmıştır. Sonrasında filtreleme ve saf su ile yıkama işlemi yapıldıktan sonra aktive edilmiş bu elyaflar 50 °C'de bir hafta boyunca kurutulmuştur. Bu işlem sonrasında kompozit imalat aşamasına geçilmiştir. Kompozit imalatında kullanılan biyo-epoksi reçine olarak Entropy Resins® Super SAP ER-ONE-3 isimli reçinesi ve Super SAP ONF isimli sertleştiricisi kullanılmıştır.

Reçine-sertleştirici oranı olarak ürün katalogunda yer alan 2:1 oranı kullanılmıştır. Tablo 2'de bu çalışma kapsamında imal edilen kompozitlere ait kompozisyonları göstermektedir.

Tablo 2. Biyo-epoksi matrisli SH takviyeli kompozitlere ait kompozisyonlar

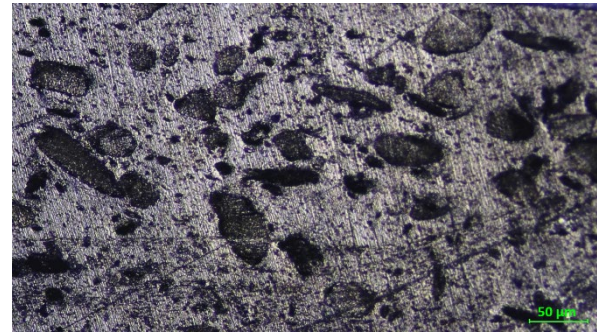
Kompozisyon Adı	Biyo-epoksi matris (kütle %)	Ayçiçeği kabuğu (kütlece %)	NaOH yüzey işlemi
Epoksi (yalın)	100	-	Yok
ESH5	Denge	5	Yok
ESH10		10	
ESH20		20	
ESH5N		5	Var
ESH10N		10	
ESH20N		20	

Kompozit bileşimleri belirlendikten sonra, Tablo 2'deki SH/reçine oranları gözetilerek karışımlar hazırlanmıştır. Epoksiye SH katılmasıyla beraber, karışımın viskozitesi yükseldiği için homojen bir karışım sağlanabilmesi için karışım 50 °C'ye ısıtılmıştır. Isıtılan bu karışım IKA® Eurostar 20 markalı yüksek hızlı karıştırıcı ile 2 saat boyunca 700 dev/dak hızında karıştırıldıktan sonra bu karışım Şekil 1d'de verilen PTFE (Teflon) kalıba dökülmüştür. Sonrasında bu kalıp sıcaklık kontrollü bir vakum fırınına alınarak burada 60 °C'de 24 saat süreyle kürlenmeye bırakılmıştır. Kürlenme sonrası numuneler, ortamdaki nem kapmaması için bir desikatörde tutulmuştur. Bu çalışmada üretilen doğal elyaf takviyeli kompozitler, Shore D sertlik ve çekme testleri ile deneysel olarak karakterize edilmiştir. Çekme testleri, Shimadzu AG-x 50 kN üniversal test cihazı kullanılarak ASTM D-638'e uygun olarak gerçekleştirilmiştir ve her kompozisyon grubu için 5 numune kullanılmıştır [43]. Shore D sertlik ölçüm aparatı ile ASTM D2240 standardına uygun olarak ölçümler yapılmıştır ve numune üzerinde 5 farklı noktadan ölçüm alınmıştır [44]. Testler yapıldıktan sonra, kırılan numunelerin kırık yüzeyleri Tescan Vega 3 taramalı elektron mikroskobu kullanılarak incelenmiştir.

III. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Deneysel çalışmaların ilk adımı olarak imal edilen kompozitler Shore D sertlik testine tabi tutulmuştur ve sonuçlar Tablo 3'te verilmiştir. Tablo 3'ün değerlendirmesinden önce, ayçiçeği kabuğunun kendi sertliği hakkında yorum yapmak gereklidir. Doğal elyafların düzenli olmayan yapılarından ve kalınlıklarından dolayı, Shore D skalasında sertliklerini ölçmek deneysel açıdan hatalı sonuçlar verebilmektedir [45]. Çünkü, Shore D yönteminde olduğu gibi makro ölçekteki bir batırıcı uç yardımıyla yapılan ölçümler kabuk üzerinde birçok nokta üzerinde alınıp ortalaması alınsa dahi tam doğru sonucu verememektedir. Bu nedenle literatürde yer alan benzer çalışmalarda kuru haldeki doğal elyafların, epoksi matristen daha sert bir yapıya sahip olduğu bilgisi verilmiştir [33,46,47].

Bununla paralelinde Tablo 3'ten elde edilen ilk izlenim, SH'lerin kompozitlerin sertliğini arttırdığıdır. SH'ler lifli yapılarından dolayı epoksi kompozitin yüzeyinin plastik deformasyonunu zorlaştırmakta ve bu şekilde sertlik artmaktadır. Tablo 3'ten gözlemlenen ikinci husus ise, NaOH ile alkali yüzey işlemi yapılan kompozisyonlar yapılmayanlara göre hem daha yüksek sertliğe sahiptir hem de sonuçlardan elde edilen sapmalar daha düşüktür. Bunun temel nedeni, yüzey işlemi öncesinde SH'lerin üzerinde yağ ve türevi kalıntıların varlığıyla birlikte epoksi/SH ara yüzeyinde görülebilecek süreksizlikler ve lokal iç kusurlar olabilir. Ayrıca sonuçlardaki standart sapmanın düşmesinin temel nedeni olarak, yüzey işlemiyle birlikte SH'lerin iç yapıda daha homojen bir şekilde yayılmasıyla, ölçümün alındığı noktalarda benzer SH dağılımı elde edildiği kanısına varılmıştır. Bu düşüncüyü desteklemek için ESH20N kompozisyonuna ait çekme numunelerinden bir tanesinden bir kesit alınmış ve soğuk bakalitleme ve parlatma sonrasında optik mikroskopla takviyelerin iç yapıdaki dağılımı incelenmiştir ve Şekil 2'de verilmiştir.

**Şekil 2.** SH takviyeli kompozitlerin optik mikroskop ile iç yapısının incelenmesi (ESH20N)

Şekil 2'de koyu renkli düzensiz şekle sahip elemanlar SH'ler olarak tanımlanmıştır. Açık renkli kısım ise epoksi reçinedir. Bu şekil, takviye elemanlarının iç yapıda homojen olarak dağıldığını destekleyici niteliktedir.

Tablo 3. SH takviyeli biyo-epoksi bazlı kompozitlerin Shore D sertlik ölçümleri

Kompozisyon Adı	Sertlik (Shore D)
Epoksi (yalın)	70 ± 0.1
ESH5	71 ± 0.8
ESH10	71.5 ± 0.6
ESH20	72.5 ± 1.2
ESH5N	71.5 ± 0.2
ESH10N	73 ± 0.4
ESH20N	75.4 ± 0.4

Elde edilen sertlik değerleri literatürde yer alan benzer çalışmalar ile de karşılaştırılmıştır. Ayçiçeği

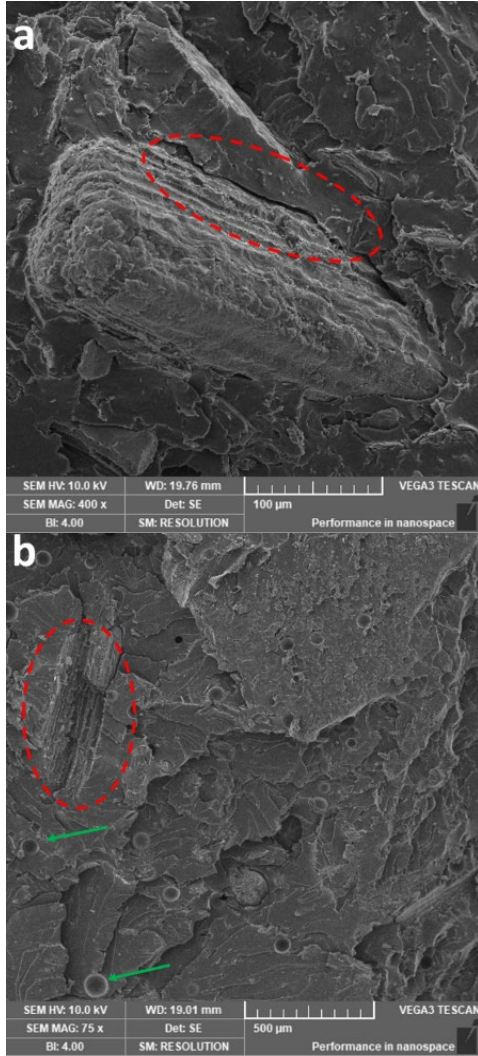
kabuğunun termoplastik matrislerde takviye elemanı olarak kullanıldığı kompozitlerde de sertlik %30 elyaf oranına kadar artış göstermiş, daha yüksek takviye oranlarında (örn: kütlece %55) ise sertliğin düştüğü görülmüştür. Bunun temel nedeni olarak da elyaf matris ara yüzeyindeki ayrışmaların ve elyaf kümelenmelerinin olduğu belirtilmiştir [48]. Sertlik ölçümlerinden sonra, çekme testleri gerçekleştirilmiştir ve sonuçlar Tablo 4'te verilmiştir. Tablo 4'te gösterilen verilere dayanarak, SH'nin epoksi matrisine katılmasının kompozitlerin çekme mukavemetinde küçük bir azalmaya yol açtığı gözlemlenebilir. Buna karşılık, üretilen kompozitlerin kopma uzamasında önemli bir düşüş görülmüştür. Bu durum, üretim süreci sırasında malzemede oluşan süreksizliklere bağlanabilir. Özellikle kimyasal yüzey işleme tabi tutulmayan kompozisyonlarda, SH'lerin yüzeyinde kalabilen yağ, vb. kalıntılar matris ve kabuklar arasındaki ara yüzey mukavemetini azaltma potansiyeline sahiptir [33]. Ayrıca, organik elyafların üretim sürecinde aglomerasyonların kolayca oluşabildiğini ve sonuçta ortaya çıkan malzemeye heterojenlik getirdiğini belirtmek gerekir [49]. Malzemeye yük uygulanması sonrasında bu heterojenliklerin varlığı iç yapıdaki gerilme çizgilerinin akıcılığını ve tutarlılığını bozarak malzemenin yük taşıma kapasitesinde düşüşe neden olur. Alkali yüzey işlemi uygulanan kompozisyonlarda daha yüksek çekme gerilmelerinin ve kopma uzamalarının gözlemlenmesi bu tezleri destekler niteliktedir. Testlerden elde edilen diğer önemli bir sonuç da SH'nin epoksi reçineye dahil edilmesiyle, kompozitlerin elastisite modülünde önemli bir artış görülmüştür. Gözlenen bu olgu, SH'nin epoksi reçineye göre daha sert bir yapıda olmasına bağlanabilmektedir [46, 47]. Kompozit malzemelerin artan rijitliği, uygulama alanlarını genişletme potansiyeline sahiptir. NaOH ile yüzey işleminin çekme deneyi sonuçlarındaki etkilerinden bahsedecek olursak, alkali yüzey işlemi sonucu SH'lerin yüzeyinden elimine edilen kalıntıların yoksunluğuyla birlikte epoksi matrisi ve SH arasında ek Van der Waals bağları kurulabilmekte ve bu bağlar sayesinde matris-fiber ara yüzey dayanımı artarak kompozitler daha yüksek çekme dayanımlarına sahip olabilmektedir. Elde edilen SH takviyeli kompozit numunelerinin mekanik özelliklerindeki değişimlerin temel sebeplerine yönelik yorum yapabilmek adına, mekanik özellik tayini için yapılan testler sırasında oluşan kırılma yüzeyleri taramalı elektron mikroskobu ile incelenmiştir.

Bu çalışma kapsamında, elyaf formundaki SH ile matris ara yüzey kalitesinin mekanik test sonuçlarına etkisini göstermek için, bir grup kompozisyonda SH toz haline getirme sonrasında direkt olarak kullanılırken, diğer grup numunelerde ise SH'ler NaOH ile yüzey işlemine tabi tutulmuştur. Bilindiği üzere NaOH işlemine tabi tutulmayan SH'ler üzerindeki hali hazırda bulunan hidroksil gruplarının varlığı, matris ile elyaf arasındaki bağlanma eğilimini düşürmektedir.

Tablo 4. SH takviyeli biyo-epoksi bazlı kompozitlere ait çekme testi sonuçları

Kompozisyon Adı	Çekme Dayanımı (MPa)	Kopma Uzaması (%)	Elastisite Modülü (GPa)
Epoksi (yalın)	48.42 ± 0.18	5.6 ± 0.3	2.61 ± 0.5
ESH5	38.24 ± 2.14	2.1 ± 0.8	2.83 ± 0.2
ESH10	40.42 ± 1.86	2.3 ± 0.9	2.88 ± 0.2
ESH20	41.88 ± 1.42	2.7 ± 0.3	2.92 ± 0.3
ESH5N	39.33 ± 1.16	2.8 ± 0.8	2.85 ± 0.1
ESH10N	41.12 ± 0.84	2.9 ± 0.9	2.91 ± 0.2
ESH20N	43.23 ± 1.42	3.2 ± 0.3	3.03 ± 0.2

Şekil 3a ve b yüzey işlemine tabi tutulmayan numunelerin kırılma sonrası yapılan SEM görüntülerini vermektedir. Şekil 3a'da kırmızı kesikli çizgiyle verilen bölgede, matris ile SH'ye ait lif demeti arasında bir boşluk görülmektedir. Bu boşluk, matris-takviye elemanı bağlanmasının yetersiz olmasından kaynaklanmaktadır. Bilindiği üzere, elyaf takviyeli kompozitlerde gerilme transferi kayma gerilmeleri ile aktarılmaktadır ve Cox modeli bu durumun mekanizmasını açıklamaktadır [50]. Lif demeti ile matris arasındaki boşluk, gerilme transferi için gerekli kritik lif uzunluğunun sağlanmasını engellemektedir. Dolayısıyla, bu süreksizlik nedeniyle matris üzerinden, yük taşıma kapasitesi olan elyaf demetine etkin bir gerilme aktarılamamaktadır. Bu da çekme gerilmelerindeki düşüşün nedenlerinden biridir. Ayrıca, Şekil 3b'de yeşil oklarla gösterildiği üzere, imalat vakum altında yapılsa dahi birtakım hava boşlukları iç yapıda gözlemlenmiştir. Bu boşluklar iç yapı kusurları şeklinde davranır ve bir yük altında gerilme konsantrasyonu oluşturarak malzemenin tahmin edildiğinden daha erken kırılmasına neden olmaktadır. Gerilme konsantrasyonu, gerilme şiddet faktörü (KI) ile nicelik olarak ifade edilebilmektedir. Yük altında iç kusurlar için kritik hal hesabı yapılırken; $KI = \sigma\sqrt{(\pi.a)} > KIc$ durumu söz konusu ise kırılma gözlenir. Burada a iç kusur boyu, σ uygulanan gerilme, KIc ise mod I için malzemenin kırılma tokluğunu vermektedir. Buradan hareketle iç yapıdaki kusurlar ne kadar büyük ve yoğun olursa malzemenin erken kırılma ihtimali artacaktır. Bahsedilen bu hasar mekanizmalarına ek olarak, Şekil 3b'de kırmızı kesikli çizgi ile gösterilen kavisli bir boşluğun varlığı, elyaf dekohezyonunun meydana geldiğini gösterir. Elyafın bulunduğu yerden fırlaması olarak ifade edilen dekohezyon, malzemenin yük taşıma kapasitesinin düşmesine neden olmaktadır.

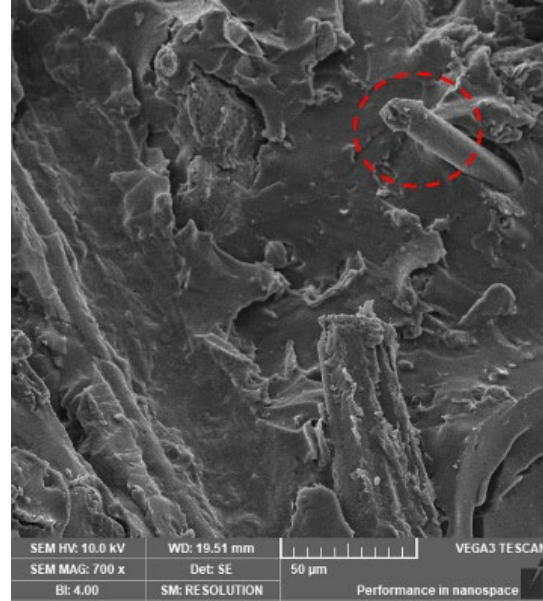


Şekil 3. SH takviyeli kompozitlerin kırılma yüzeyleri
a) ara yüzey boşluğu b) dekohezyon

Son olarak da Şekil 4'te kırmızı kesikli çizgi ile verilen kırılma yüzeyine dik olarak gözlemlenen lif, iç yapıdaki toklaştırma mekanizmalarından birisi olan yerinden sökülme (pull-out) etkisini göstermektedir. Bu sökülme esnasında elyaf demeti, yüzey kuvvetleri ile yer değiştirir ve bunun gerçekleşmesi için bir miktar enerji harcanması gereklidir. Harcanan bu enerji test esnasındaki şekil değiştirme enerjisinden karşılanır ve çatlağın ilerlemesi için gerekli enerjinin bir miktarı tüketilerek kırılma geciktirilir. Bu mekanizma genellikle köprüleme mekanizması ile birlikte görülür. Köprüleme etkisi kapsamında, çatlak ilerlemeye devam ederken çatlak bölgesinde bulunan lifler, çatlakın iki yanını adhezyon kuvveti nispetinde bir arada tutar [51], [52]. Bu şekilde çatlakın açılması geciktirilmiş olur. Bu etki liflerin malzemedeki oranı yükseldikçe artış gösterebilmektedir ve bu durum Tablo 4'te verilen sonuçlarla paralellik arz etmektedir.

Burada incelenen, hasar ve toklaştırma mekanizmaları ve iç kusurların hepsinin birlikte çekme testi sonuçlarına etki etmektedir. Yukarıda bahsedilen mekanizmalar dahilinde çatlak ilerlemesi geciktirilmiş olsa dahi, iç yapı kusurlarının, heterojenitenin ve

süreksizliklerin yoğunluğunun yüksek olduğu durumlarda gerilme konsantrasyonu etkisi daha dominant bir karakter gösterir ve imal edilen malzemelerde erken kırılmalar gözlemlenebilmektedir.



Şekil 4. SH takviyeli biyo-epoksi matrisli kompozitlerde gözlemlenen çatlak köprüleme mekanizması

IV. SONUÇ

İmalat sektörü, iklim krizi, azalan kaynaklar ve artan hammadde maliyetleri nedeniyle yeni sürdürülebilir, uygun maliyetli ve hafif malzemelerin geliştirilmesine yönelmiştir. Günümüzde, doğal elyaf takviyeli kompozitler, çelik gibi geleneksel malzemelerin yerine uygulanabilir alternatifler oluşturmaktadır. Tarım atığı olarak karışımıza çıkan doğal elyaflar arasında ayçiçeği kabuğu, rahat erişilebilir olması ve avantajlı malzeme özellikleri nedeniyle önemli bir potansiyel içermektedir. Bu çalışma kapsamında, biyo-epoksi matrisi ile ayçiçeği kabukları toz haline getirildikten sonra karıştırılarak kompozitler imal edilmiş ve sonrasında çekme deneyleri ve sertlik ölçümleriyle birlikte deneysel olarak karakterize edilmişlerdir. Ayrıca, bu kompozitler geliştirilirken, ayçiçeği kabuklarının NaOH ile yüzey işlemine tabi tutulmasının mekanik performansa etkisi de incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, SH takviyesi kompozitlerin çekme dayanımını ve kopma uzamasını düşürürken, elastisite modülünü arttırmıştır. NaOH işlemi de mekanik sonuçlarda bir artışı beraberinde getirmiştir. Mekanik özelliklerin tespitine yönelik çekme deneyinden sonra hasarlı numunelerin kırılma yüzeyleri SEM ile incelenmiş ve yüzey işlemine tabi tutulmayan numunelerde ara yüzey problemleri gözlemlenmiştir. Ayrıca elyaf sökülmesi (pull-out) ve çatlak köprüleme mekanizmaları da bu tip doğal elyaf takviyeli kompozitlerde bir toklaştırma mekanizması olarak karışımıza çıkmıştır.

Sonuç olarak, bu çalışma neticesinde elde edilen kompozitler, literatürdeki benzer çalışmalarla

karşılaştırmalı olarak değerlendirildiğinde, geliştirilen kompozitlerin en büyük avantajları biyo-bozunabilirliği, düşük maliyeti ve sürdürülebilir nitelikleridir. Öte yandan termoset reçinelerin imalat prosesi, termoplastiklere oranla otomatize edilmesi açısından daha zordur. Tüm bu avantajlar ve dezavantajlar birlikte değerlendirildiğinde bu projede geliştirilen bu kompozitler otomotiv sektöründe stepne yuvaları, koltuk arkalıkları, bagaj zeminleri, kapılardaki akustik paneller ve hava yastığı muhafazaları dahil olmak üzere birçok bileşende hafifletme uygulamaları için önemli potansiyel taşımaktadır.

TEŞEKKÜR

Yazarlar biyo-epoksi malzeme desteği açısından Etap Marin'den Sema Çarkçı'ya teşekkür etmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] General Assembly of UN. (2015). *Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development*. <https://documents-dds-ny.un.org/doc/UNDOC/GEN/N15/291/89/PDF/N1529189.pdf?OpenElement>
- [2] [Kuram, E. (2021b). Advances in development of green composites based on natural fibers: a review. *Emergent Materials*, 5. <https://doi.org/10.1007/s42247-021-00279-2>
- [3] Zweben, C. (2005). Composite Materials. *Mechanical Engineers' Handbook*, 380–417. <https://doi.org/10.1002/0471777447.ch10>
- [4] Cheah, L. W. (2010). Cars on a Diet: The Material and Energy Impacts of Passenger Vehicle Weight Reduction in the U.S. Doktora Tezi, Massachusetts Institute Of Technology, Amerika Birleşik Devletleri s. 31-34.
- [5] Ravishankar, B., Nayak, S. K., & Kader, M. A. (2019). Hybrid composites for automotive applications – A review. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 38(18), 835–845. <https://doi.org/10.1177/0731684419849708>
- [6] Bolat, Ç., Ergene, B., Karakılınç, U., & Gökşenli, A. (2021). Investigating on the machinability assessment of precision machining pumice reinforced AA7075 syntactic foam. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 236(5), 2380–2394. <https://doi.org/10.1177/09544062211027613>
- [7] Ergene, B., Şekeroğlu, İ., Bolat, Ç., & Yalçın, B. (2021). An experimental investigation on mechanical performances of 3D printed lightweight ABS pipes with different cellular wall thickness. *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*, 15(2), 8169–8177. <https://doi.org/10.15282/jmes.15.2.2021.16.0641>
- [8] Rosen, D. W. (2007). Computer-Aided Design for Additive Manufacturing of Cellular Structures. *Computer-Aided Design and Applications*, 4(5), 585–594. <https://doi.org/10.1080/16864360.2007.10738493>
- [9] Ergene, B., & Yalçın, B., (2022). Eriyik yığma modelleme (EYM) ile üretilen çeşitli hücresel yapıların mekanik performanslarının incelenmesi. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 38(1), 201–218. <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.945650>
- [10] Ergene, B. (2021). Farklı bağıl yoğunluklardaki Inconel 718 ve Ti6Al4V biyomedikal parçaların seçici lazer ergitme (SLE) metoduyla üretiminin simülasyonu. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 37(1), 469–484. <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.934143>
- [11] Fragassa, C., Santulli, C., Pavlović, A., & Šljivić, M. (2015). Improving performance and applicability of green composite materials by hybridization. *Contemporary Materials*, 6(1). <https://doi.org/10.7251/comen1501035f>
- [12] Appadurai, M., Fantin Irudaya Raj, E., & LurthuPushparaj, T. (2022). Sisal fiber-reinforced polymer composite-based small horizontal axis wind turbine suited for urban applications—a numerical study. *Emergent Materials*. <https://doi.org/10.1007/s42247-022-00375-x>
- [13] [Mayilswamy, N., & Kandasubramanian, B. (2022). Green composites prepared from soy protein, polylactic acid (PLA), starch, cellulose, chitin: a review. *Emergent Materials*. <https://doi.org/10.1007/s42247-022-00354-2>
- [14] Vijayan, R., & Krishnamoorthy, A. (2019). Review On Natural Fiber Reinforced Composites, *Materials Today: Proceedings*, 16(2), 897-906, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.05.175>.
- [15] Bledzki, A.K., & Gassan, J. (1999). Composites reinforced with cellulose based fibres, *Progress in Polymer Science*, 24(2), 221-274, [https://doi.org/10.1016/S0079-6700\(98\)00018-5](https://doi.org/10.1016/S0079-6700(98)00018-5).
- [16] Açıkbaş, G. (2018). Interfacial and physico-mechanical properties of walnut shell fiber reinforced polyester matrix composites. *Materials Testing*, 60(5), 510-518. <https://doi.org/10.3139/120.111176>
- [17] Gürü, M., Atar, M., & Yıldırım, R. (2008). Production of polymer matrix composite particleboard from walnut shell and improvement of its requirements. *Materials & Design*. 29. 284-287. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2006.10.023>.
- [18] Gokdai, D., Borazan, A.A. & Acikbas, G. (2017). Effect of Marble: Pine Cone Waste Ratios on Mechanical Properties of Polyester Matrix Composites. *Waste Biomass Valor*, 8, 1855–1862. <https://doi.org/10.1007/s12649-017-9856-6>
- [19] Kalia, S., Kaith, B. S., & Kaur, I. (2009). Pretreatments of natural fibers and their application as reinforcing material in polymer composites-A review. *Polymer Engineering & Science*, 49(7), 1253–1272. <https://doi.org/10.1002/pen.21328>

- [20] Gholampour, A., & Ozbakkaloglu, T. (2019). A review of natural fiber composites: properties, modification and processing techniques, characterization, applications. *Journal of Materials Science*, 55(3), 829–892. <https://doi.org/10.1007/s10853-019-03990-y>
- [21] Faruk, O., Bledzki, A. K., Fink, H.-P., & Sain, M. (2012). Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000–2010. *Progress in Polymer Science*, 37(11), 1552–1596. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2012.04.003>
- [22] Brebu, M. (2020). Environmental Degradation of Plastic Composites with Natural Fillers—A Review. *Polymers*, 12(1), 166. <https://doi.org/10.3390/polym12010166>
- [23] Elmali, M., & Demir, I. (2020). Organik atıkların yapı malzemesi olarak kullanılabilirliğinin araştırılması. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 8. 1303-1311. 10.21923/jesd.781554.
- [24] Ersus, S., Yağın Melikoğlu, A., & Cesur, S. (2019). Tarımsal Atıklardan Selüloz Nanokristallerinin Eldesi, Karakteristik Özellikleri ve Uygulama Alanları. *Akademik Gıda*, 17. 140-148. 10.24323/akademik-gida.544980.
- [25] Kapluhan, E. (2014). Enerji coğrafyası açısından bir inceleme: biyokütle enerjisinin dünyadaki ve Türkiye'deki kullanım durumu. *Marmara Coğrafya Dergisi*, 0 (30), 0-. DOI: 10.14781/mcd.98631
- [26] Uzun, B. B., Kılıç, M., & Pütün, A. E. (2007). Ayçiçeği yağından transesterifikasyon yöntemiyle biyodizel üretimi, *1.Ulusal Yağlı Tohumlu Bitkiler ve Biyodizel Sempozyumu*, p. 3
- [27] Kılıç, F. (2007)., Gıda ve yakıt amaçlı kanola ve aspir üretim potansiyeli ve bazı yağlı tohumlu bitkilerin yakıtla ilişkili önemli özellikleri, *1.Ulusal Yağlı Tohumlu Bitkiler ve Biyodizel Sempozyumu*, p. 51
- [28] T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı Tarımsal Ekonomi ve Politika Geliştirme Enstitüsü Müdürlüğü. Tarım Ürünleri Piyasaları. <https://arastirma.tarimorman.gov.tr/tepge/Menu/27/Tarim-Urunleri-Piyasaları>
- [29] Perea-Moreno, M.-A., Manzano-Agugliaro, F., & Perea-Moreno, A.-J. (2018). Sustainable Energy Based on Sunflower Seed Husk Boiler for Residential Buildings. *Sustainability*, 10(10), 3407. <https://doi.org/10.3390/su10103407>
- [30] Binboğa, M. Ü. (2019). An Overview of Importance and Sunflower (*Helianthus annuus* L.) Production. *International Journal of Life Sciences and Biotechnology*, 2(2), 58–71. <https://doi.org/10.38001/ijlsb.535889>
- [31] Bala-Litwiniak, A., & Zajemska, M. (2020). Computational and experimental study of pine and sunflower husk pellet combustion and co-combustion with oats in domestic boiler. *Renewable Energy*, 162, 151–159. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.07.139>
- [32] Barczewski, M., Sałasińska, K., & Szulc, J. (2019). Application of sunflower husk, hazelnut shell and walnut shell as waste agricultural fillers for epoxy-based composites: A study into mechanical behavior related to structural and rheological properties. *Polymer Testing*, 75, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2019.01.017>
- [33] Salasinska, K., & Ryszkowska, J. (2014). The effect of filler chemical constitution and morphological properties on the mechanical properties of natural fiber composites. *Composite Interfaces*, 22(1), 39–50. <https://doi.org/10.1080/15685543.2015.984521>
- [34] Barczewski, M., Andrzejewski, J., Majchrowski, R., Dobrzycki, K., & Formela, K. (2021). Mechanical Properties, Microstructure and Surface Quality of Polypropylene Green Composites as a Function of Sunflower Husk Waste Filler Particle Size and Content. *Journal of Renewable Materials*, 9(5), 841–853. <https://doi.org/10.32604/jrm.2021.014490>
- [35] Barczewski, M., Matykiewicz, D., Piasecki, A., & Szostak, M. (2017). Polyethylene green composites modified with post agricultural waste filler: thermo-mechanical and damping properties. *Composite Interfaces*, 25(4), 287–299. <https://doi.org/10.1080/09276440.2018.1399713>
- [36] Kuram, E. (2020). Rheological, mechanical and morphological properties of acrylonitrile butadiene styrene composite filled with sunflower seed (*Helianthus annuus* L.) husk flour. *Journal of Polymer Research*, 27(8). <https://doi.org/10.1007/s10965-020-02211-4>
- [37] Kárpáti, Z., Kun, D., Fekete, E., & Móczó, J. (2021). Structural biomaterials engineered from lignocellulosic agricultural waste. *Journal of Applied Polymer Science*, 138(26), 50617. <https://doi.org/10.1002/app.50617>
- [38] Saba, N., Jawaid, M., Alothman, O. Y., Paridah, M., & Hassan, A. (2015). Recent advances in epoxy resin, natural fiber-reinforced epoxy composites and their applications. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 35(6), 447–470. <https://doi.org/10.1177/0731684415618459>
- [39] Kalia, S., Kaith, B. S., & Kaur, I. (2009). Pretreatments of natural fibers and their application as reinforcing material in polymer composites-A review. *Polymer Engineering & Science*, 49(7), 1253–1272. <https://doi.org/10.1002/pen.21328>
- [40] Thamae, T., & Baillie, C. (2007). Influence of fibre extraction method, alkali and silane treatment on the interface of Agave americana waste HDPE composites as possible roof ceilings in Lesotho. *Compos. Interfaces*, 14, 821–836.
- [41] Goud, G., & Rao, R.N. (2011). Effect of fibre content and alkali treatment on mechanical properties of Roystonea regia-reinforced epoxy

- partially biodegradable composites. *Bull. Mater. Sci.*, 34, 1575–1581.
- [42] Yan, L. (2012). Effect of alkali treatment on vibration characteristics and mechanical properties of natural fabric reinforced composites. *J. Reinf. Plast. Compos.*, 31, 887–896.
- [43] **Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics** <https://www.astm.org/d0638-10.html>
- [44] American Society for Testing and Materials. (1972). *Glossary of terms relating to rubber and rubber technology*. ASTM.
- [45] Sheppard, S. E., & Schmitt, J. J. (1932). Measurement of surface hardness of cellulose derivatives. *Industrial & Engineering Chemistry*, 4(3), 302–304. <https://doi.org/10.1021/ac50079a027>
- [46] Sain, M., Park, S. H., Suhara, F., & Law, S. (2004). Flame retardant and mechanical properties of natural fibre-PP composites containing magnesium hydroxide. *Polymer Degradation and Stability*, 83(2), 363–367. [https://doi.org/10.1016/s0141-3910\(03\)00280-5](https://doi.org/10.1016/s0141-3910(03)00280-5)
- [47] Chen, X., Yu, J., Guo, S., Lu, S., Luo, Z., & He, M. (2009). Surface modification of magnesium hydroxide and its application in flame retardant polypropylene composites. *Journal of Materials Science*, 44(5), 1324–1332. <https://doi.org/10.1007/s10853-009-3273-6>
- [48] Cisneros-López, E. O., González-López, M. E., Pérez-Fonseca, A. A., González-Núñez, R., Rodrigue, D., & Robledo-Ortiz, J. R. (2016). Effect of fiber content and surface treatment on the mechanical properties of natural fiber composites produced by rotomolding. *Composite Interfaces*, 24(1), 35–53. <https://doi.org/10.1080/09276440.2016.1184556>
- [49] Irez, A. B. & Kaya, R. (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 .
- [50] Cox, H. L. (1952). The elasticity and strength of paper and other fibrous materials. *British Journal of Applied Physics*, 3(3), 72–79. <https://doi.org/10.1088/0508-3443/3/3/302>
- [51] Wells, J.-P. R., & Peter. (1985). Debonding and pull-out processes in fibrous composites. *Journal of Materials Science*, 20(4), 1275–1284. <https://doi.org/10.1007/bf01026323>
- [52] Irez, A. B. & Yirik, S. (2023). Development of Cost-Effective Sustainable Hybrid Composites Based on Recycled PP and Chopped Carbon Fibers. *Proceedings of the 8th International Conference on Mechanical, Automotive and Materials Engineering*, 145–155. https://doi.org/10.1007/978-981-99-3672-4_12