



DERİ TAKVİYELİ EPOKSİ NUMUNELERİN MEKANİK VE TRİBOLOJİK ÖZELLİKLERİ

Hilal CAN^{1*}, Fatmanur TUNÇER², Selver CİN³

¹ Pamukkale Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Denizli, Türkiye

² Haliç Üniversitesi, Meslek Yüksek Okulu, İmalat Yürütme Sistemleri Bölümü, İstanbul, Türkiye

³ Pamukkale Halk Eğitim Merkezi, El Sanatları Öğretmeni, Denizli, Türkiye

Anahtar Kelimeler	Öz
<i>Deri kompozit, Epoksi, Mekanik Özellikler, Aşınma, Triboloji.</i>	Sanayi atıklarının geri dönüştürülmesi ve yeniden kullanımı çevresel sürdürülebilirlik açısından giderek daha önemli hale gelmektedir. Deri endüstrisinde ham derinin yalnızca yaklaşık %25'i kullanılabilir ürüne dönüştürülebilmektedir. Bu durum, deri atıklarının farklı alanlarda değerlendirilmesini önemli hale getirmektedir. Bu çalışmada, aksesuar üretiminde dikiş için açılan 2 mm'lik deliklerden elde edilen yağlı ve doğal tabaklanmış deri parçacıkları epoksi matrise eklenerek kompozitler üretilmiştir. Üretilen kompozitlerin mekanik ve tribolojik özellikleri saf epoksi ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, deri katkısının epoksinin çekme dayanımını düşürdüğünü ancak kopma uzamasını artırdığını göstermiştir. Doğal tabaklanmış deri en yüksek kopma uzamasını sağlarken, yağlı deri katkılı kompozitler aşınma testlerinde daha düşük kütle kaybı ile daha yüksek aşınma direnci göstermiştir. Ayrıca aşınmada adeziv ve abrazif mekanizmaların birlikte gerçekleştiği ve partiküllerin homojen dağılımının tribolojik performans için kritik olduğu belirlenmiştir.

MECHANICAL AND TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF LEATHER REINFORCED EPOXY SAMPLES

Keywords	Abstract
<i>Leather composite, Epoxy, Mechanical Properties, Wear, Tribology.</i>	Recycling and reusing industrial waste has become increasingly important for environmental sustainability. In the leather industry, only about 25% of raw hide can be converted into usable products. This situation makes it important to utilize leather waste in different applications. In this study, oily and naturally tanned leather particles obtained from 2 mm stitching holes created during accessory production were incorporated into an epoxy matrix to produce composites. The mechanical and tribological properties of the produced composites were compared with those of pure epoxy. The results showed that the addition of leather reduced the tensile strength of epoxy but increased its elongation at break. Composites containing naturally tanned leather exhibited the highest elongation at break, whereas oily leather-reinforced composites demonstrated higher wear resistance with lower mass loss in wear tests. In addition, both adhesive and abrasive wear mechanisms were observed, and the homogeneous distribution of leather particles within the matrix was found to be critical for improving tribological performance.

Alıntı / Cite

Can H., Tunçer F., Cin S., (2026). Deri Takviyeli Epoksi Numunelerin Mekanik ve Tribolojik Özellikleri, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 14(1), 110-122.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)	Makale Süreci / Article Process
Can H, 0000-0003-2511-3565	Başvuru Tarihi / Submission Date
Tunçer F, 0000-0001-5627-8720	Revizyon Tarihi / Revision Date
Cin S, 0009-0008-0983-7081	Kabul Tarihi / Accepted Date
	Yayın Tarihi / Published Date

* İlgili yazar / Corresponding author: hilalcan@pau.edu.tr +90-258-2964132

MECHANICAL AND TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF LEATHER REINFORCED EPOXY SAMPLES

Hilal CAN^{1†}, Fatmanur TUNÇER², Selver CİN³

¹ Pamukkale University, Faculty of Technology, Department of Metallurgy and Material Engineering, Denizli, Türkiye

² ,Haliç University, Vocational School, Istanbul, Türkiye

³ Pamukkale Public Education Center, Craft Teacher, Denizli, Türkiye

Highlights

- Crazy horse and natural leather reinforcement reduced tensile strength by ~50% and ~33%, respectively.
- Leather particle reinforcement improved wear resistance but reduced tensile strength.
- Lower mass loss was observed in crazy horse leather-reinforced epoxies during wear.
- SEM revealed adhesive–abrasive wear with microcracks from poor filler bonding.

Purpose and Scope

The aim of this study is to investigate the mechanical and tribological properties of composite materials fabricated by incorporating waste particles of naturally tanned and oil-treated leather (known as crazy horse), which are generated during the hole-punching process for producing accessories like bags, as a reinforcing element within an epoxy matrix.

Design/methodology/approach

Tensile and wear test specimens were designed in SolidWorks according to ASTM D638-10 and ASTM G132-96 standards and 3D printed to produce silicone molds. Composite samples were cast by incorporating 2 mm waste particles from naturally tanned (1.8 mm) and oil-treated (crazy horse, 1 mm) leathers into an epoxy matrix at a 5 wt% reinforcement ratio. The prepared specimens were subsequently examined to assess the mechanical and tribological performance of the composites reinforced with leather particles.

Findings

Leather reinforcement reduced the tensile strength of epoxy by about 31% with naturally tanned leather and 48% with oily leather, while elongation at break increased to 2.38% and 3.66%, respectively, compared to 1.98% in epoxy. The elastic modulus decreased with leather addition. After abrasion, Ra values rose from 1.831 µm (epoxy) to 2.974 µm (naturally tanned) and 2.864 µm (oily leather), with the lower roughness of oily leather composites linked to reduced material loss. SEM images revealed more severe scratches and micro-pitting in naturally tanned leather composites, while oily leather composites showed smoother surfaces but still exhibited wear, indicating partial improvement in wear resistance yet limited interfacial bonding under high loads.

Research limitations/implications

In this study, leather particles from accessory manufacturing were used as reinforcement, but microstructural analysis revealed weak particle–matrix adhesion and poor dispersion. Future work should explore surface modifications and reinforcement strategies to improve compatibility and wear resistance, while vacuum-assisted processing could reduce voids and enhance mechanical performance.

Practical implications

The integrity of leather-reinforced composites relies on optimized particle size, uniform dispersion, and vacuum-assisted processing, which together enhance load transfer, reduce voids, and improve mechanical and tribological performance.

Social Implications

Using leather waste as reinforcement promotes resource efficiency and circularity, while improved polymer durability extends component lifespan, supporting environmental sustainability.

Originality

In this study, naturally tanned and crazy horse leathers were used as reinforcements within the epoxy matrix. The novelty lies in employing a single type of leather throughout the composite, rather than mixed or waste leathers, allowing a controlled assessment of their effect on mechanical and tribological properties.

[†] İlgili yazar / Corresponding author: hilalcan@pau.edu.tr, +90-258-296-4132

1. Giriş (Introduction)

Günümüzde sürdürülebilirlik ve karbon ayak izi azaltma alanlarındaki çalışmalar, endüstriyel üretim süreçlerinde atıkların değerlendirilmesini zorunlu hale getirmiştir. Bu kapsamda deri endüstrisi, yüksek üretim hacmi ve kimyasal işlem çeşitliliği nedeniyle çevresel açıdan en kritik sektörlerden biridir. Deri işleme; tabaklama, boyama ve finisaj gibi aşamalarda çok sayıda kimyasalın kullanıldığı karmaşık bir süreçtir. Özellikle kromla tabaklanmış deri atıkları, içerdiği ağır metal bileşenleri nedeniyle hem çevre hem de insan sağlığı açısından risk oluşturmaktadır. Bu tür atıkların çevreye zarar vermeden yeniden değerlendirilmesi, sürdürülebilir üretim anlayışının temel gerekliliklerinden biridir (Sivakumar ve Mohan, 2020).

Deri atıklarının katma değerli ürünlerde değerlendirilmesi yalnızca çevresel risklerin azaltılmasına değil, aynı zamanda ekonomik katkı sağlanmasına da olanak tanımaktadır. Lifli yapısı, protein esaslı bileşimi ve esnekliği, deriyi polimer matrisli kompozit sistemlerde takviye elemanı olarak kullanıma uygun hale getirmektedir. Böylece hem atık yönetimi hem de malzeme performansı açısından çift yönlü fayda sağlanmaktadır. Ancak deri takviyeli kompozitlerde lif dağılımı, ara yüzey etkileşimi ve uzun vadeli dayanım gibi konular araştırmaya açık alanlardır. Atık derinin kompozit üretiminde değerlendirilmesi; depolama/yakma yükünü azaltma, kimyasal tüketimini düşürme ve geri dönüşüm yaklaşımına katkı sağlama potansiyeli taşımaktadır (Parisi vd., 2021; Teklay vd., 2017; Tauhiduzzaman vd., 2023).

Deri işleme sürecinde, ham derinin yalnızca yaklaşık %25'i nihai ürüne dönüşebilmektedir. Derini kesilmesi, delinmesi ve zımparalanması esnasında önemli miktarda üretim artığı oluşmaktadır. Bu atıkların yeniden kullanımı için çeşitli yöntemler geliştirilmiş olsa da literatürdeki çalışmaların çoğu tabaklama sürecinde hatalı üretim süreçlerinde oluşan kromlu deri atıkları üzerine odaklanmıştır. Buna karşılık, çanta ve aksesuar gibi üretimler sonrası süreçte doğal tabaklanmış ve yağlı (crazy horse) deri türlerinden oluşan atıkların geri dönüşümü mümkündür.

2. Kaynak Araştırması (Literature Survey)

Son yıllarda deri atıklarının geri dönüşümüne yönelik çalışmalar, sürdürülebilir malzeme üretimi ve atık yönetimi perspektifinden hız kazanmıştır. Sivakumar ve Mohan (2020); Chaturvedi ve Sultan (2025); Barrera Torres vd. (2025), Nassef vd. (2022); Şaşmaz (2016) deri atıklarının çevreye zararsız yöntemlerle geri kazanılmasının önemini vurgulamış; fiziksel ve kimyasal geri dönüşüm tekniklerinin etkinliğini araştırmıştır. Bu çalışmalar, deri atıklarının işlevsel malzemelere dönüştürülmesinin hem çevresel hem de ekonomik açıdan uygulanabilir olduğunu göstermiştir.

Literatürde yer alan çalışmaların bütününe bakıldığında, deri kompozitleri alanında yapılan araştırmalar, atık derinin TPU, EVA, LLDPE, epoksi ve NBR/NR gibi termoplastik/termoset/elastomer matrislerde değerlendirilmesine dayalı atık değerlendirme uygulamaları ve doğal derinin iletken/koruyucu fazlarla fonksiyon kazanımına dayalı giyilebilir koruma, zırhlama ve akıllı sistemlere yönelmesi (Parisi vd., 2021; Fan vd., 2023; Li vd., 2020; Fan vd., 2024) şeklinde iki ana doğrultuda ilerlemektedir. Atık deri takviyeli kompozitlerde mekanik çıktılar (çekme dayanımı, uzama, sertlik) ile tribolojik çıktılar (kütle kaybı, özgül aşınma oranı, yüzey morfolojisi) büyük ölçüde matris türü, deri atığının kimyasal durumu (kromlu/kromsuz; yağlı/yüksüz), takviye morfolojisi (lif-toz-talaş/partikül) ve matris-takviye eleman arayüzlerinin durumu ve takviye malzemenin dağılımı tarafından belirlenmektedir (Parisi vd., 2021; Sharma vd., 2023; Hang vd., 2020; Noyon vd., 2022; Raksakri ve Phunpeng, 2022; Teklay vd., 2017; Tauhiduzzaman vd., 2023). Bu çerçevede, deri atıklarının performans hedeflerine göre tasarlanabilir bir takviye elemanıdır ancak arayüz kontrolü ve işleme stratejilerine yüksek duyarlılık göstermektedir (Parisi vd., 2021; Sharma vd., 2023; Hang vd., 2020).

Biyobozunur matrislerde yapılan çalışmalar, deri atığı ilavesinin çekme dayanımı ve modülü artırabildiğini göstermektedir; örneğin PCL ve PLA matrislerine deri atığı ilavesi ile bu parametrelerde %15–25 aralığında artış bulunmuştur (Joseph vd., 2017; Ambone vd., 2017). Termoplastik sistemlerde ise deri tozu katkısının elastisite modülünü yaklaşık 1,5 kat artırdığı, ancak uzama oranını düşürdüğü bildirilmiştir (Sharma vd., 2023; Kılıç vd., 2020). Raksakri ve Phunpeng (2022), doğal kauçuk (NR) matrisine iki farklı deri atığını 20–80 phr aralığında ilave ederek deri benzeri kompozitler üretmiştir. Tüm kompozitlerde %200 kopma uzamasında sertlik ve modül artışı bulunmuştur.

Epoksi reçine tabanlı kompozitlerde performansın, takviyenin türü ve birlikte kullanılan katkılara duyarlı olduğu görülmektedir. Deri liflerinin nano-TiO₂ gibi katkılarla birlikte kullanıldığı sistemlerde çekme dayanımında %30'a varan iyileşme ve termal kararlılıkta belirgin artış elde edilmiştir (Senthil vd., 2015). Bununla birlikte deri katkısının her zaman olumlu sonuç vermediği de raporlanmaktadır: LDPE (düşük yoğunluklu polietilen) kompozitlerinde darbe ve eğilme dayanımında iyileşme gözlenirken (Alemu, 2021), ABS matrisli kompozitlerde

deri tozunun çekme modülünü düşürebildiği belirtilmiştir (Ramaraj, 2017). EPDM (Etilen propilen dien monomer) sistemlerinde ise %20 deri katkısının çekme dayanımını azalttığı, buna karşın yırtılma direncini yaklaşık iki katına çıkardığı rapor edilmiştir (Meşe vd., 2014, 2018). Son yıllarda özellikle biyobazlı reçineler ve doğal liflerle birlikte atık deri kullanımının arttığı; örneğin fenolik reçine sistemlerinde eğilme dayanımında %18 artış (Nassef vd., 2022) ve poliüretan matrisli kompozitlerde su emmenin %40 azalması (Fan vd., 2023) gibi çıktılar elde edildiği bildirilmektedir.

Deri atığının ısı-akustik yalıtım panellerinde (Teklay vd., 2017; Tauhiduzzaman vd., 2023; Kodaloğlu vd., 2024) ve doğal derinin MXene veya Bi/Ce gibi fazlarla fonksiyonelleştirilerek EMI (elektromanyetik girişim) kalkanlama, ve X-ray koruma gibi alanlarda “akıllı/koruyucu” amaçlarla kullanımına dair çalışmalar da bulunmaktadır (Fan vd., 2023; Li vd., 2020; Fan vd., 2024). Keçi derisi ve palmiye lifi takviyeli epoksi kompozitlerde takviye oranı optimize edilerek darbe dayanımında %35 artış elde edildiği bildirilmiştir (Surianarayanan vd., 2024). PVA bağlayıcıyla üretilen deri kompozitlerinin 3000 Hz’de %61 ses sönümleme kapasitesi sergilemesi, bu malzemelerin akustik yalıtım açısından da değerlendirilebileceğini göstermektedir (Kodaloğlu & Kodaloğlu, 2024). Ayrıca deri atıklarının beton, asfalt ve kauçuk kompozitlerde kullanılmasıyla çatlak direnci ve yüzey dayanımının artabildiği rapor edilmiştir (Parisi vd., 2021). Atık-deri/polimer kompozitlerinin zemin kaplama, ayakkabı, panel ve film gibi alanlarda yaygınlaştığı görülmektedir (Sharma vd., 2023; Hang vd., 2020; Noyon vd., 2022; Raksaksri ve Phunpeng, 2022, Nassef vd., 2022). Yapı ölçeğinde ısı-akustik yalıtım uygulamalarının rapor edilmesi, atık deri kullanımının sürdürülebilirlik açısından önemini güçlendirmektedir (Kodaloğlu vd., 2024; Teklay vd., 2017; Tauhiduzzaman vd., 2023). Buna ek olarak biyobazlı “vegan deri” benzerleri, hayvansal deriye alternatif çok katmanlı biyokompozit yaklaşımlar olarak yeni bir araştırma hattı oluşturmuştur (Wijayarathna vd., 2025). Bu geniş uygulama yelpazesi, deri kompozitlerini hem atık yönetimi hem de ileri fonksiyon kazandırma açısından hızla büyüyen çok disiplinli bir araştırma alanı hâline getirmiştir.

Literatürde deri atıklarının geri kazanımına ilişkin çalışmaların büyük bölümü, tabaklama aşamasında oluşan kromlu talaş/toz atıklara odaklanmaktadır. Buna karşın, doğal tabaklanmış ve yağlı (crazy horse) derilerin tabaka olarak üretiminden sonra aksesuar imalatında delme (zımba) gibi işlemler sırasında ortaya çıkan küçük parçacık formundaki ikincil üretim artıklarının kompozit takviyesi olarak değerlendirilmesine yönelik sistematik çalışmalar sınırlıdır. Bu boşluktan hareketle, bu çalışma farklı deri türlerinin (doğal tabaklanmış ve yağlı/crazy horse) aynı epoksi matrisle takviye olarak kullanılmasını inceleyerek, atığın kaynağı ve kimyasal doğasıyla kompozit davranışı arasındaki ilişkiyi doğrudan test etmeyi amaçlamıştır. Bu yaklaşım, tabakhane kaynaklı deri atıklarını ele alan önceki çalışmaların çizgisinden (Fan vd., 2023; Li vd., 2020; Fan vd., 2024; Parisi vd., 2021; Chaturvedi & Sultan, 2025) ayrılarak, özellikle yağ fazının sınır yağlama ve tribofilm kararlılığı üzerinden aşınma performansı belirgin biçimde etkileyebildiğini deneysel olarak ortaya koymuştur.

3. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

Bu çalışmada epoksi matrisli kompozitlerin üretiminde takviye malzemesi olarak doğal tabaklanmış ve yağlı (crazy horse) deri parçacıkları kullanılmıştır. Takviye elemanı olarak kullanılan deriler, çanta ve aksesuar üretiminde dikiş öncesi delme işlemleri sırasında ortaya çıkan atıklardan elde edilmiştir. Her iki deri türü de 2 mm çapında çarklı zımba ile delinmiş, delme işleminden çıkan atık parçacıklar toplanarak oda koşullarında kurutulmuştur.

Doğal tabaklanmış derinin kalınlığı ortalama 1,8 mm, yağlı derinin ise 1,0 mm olarak ölçülmüştür. Her iki takviye türü, Resinin Slim ticari adıyla temin edilen şeffaf epoksi reçine (80 Shore D sertlik, 1,23 g/cm³ yoğunluk) içinde ağırlıkça %5 oranında ilave edilmiştir. Sertleştirici oranı, üretici tavsiyesine uygun şekilde 2:1 olarak belirlenmiştir.

Kanagy ve Wallace (1943) tarafından bildirilen yoğunluk değerleri temel alınarak doğal tabaklanmış deri için 1,03 g/cm³, yağlı deri için 0,94 g/cm³ yoğunluk değerleri kullanılmıştır. Kompozit numunelerin teorik yoğunluğu Denklem (1) ile hesaplanmıştır:

$$\rho_K = \%m.\rho_m + \%t.\rho_t \quad (1)$$

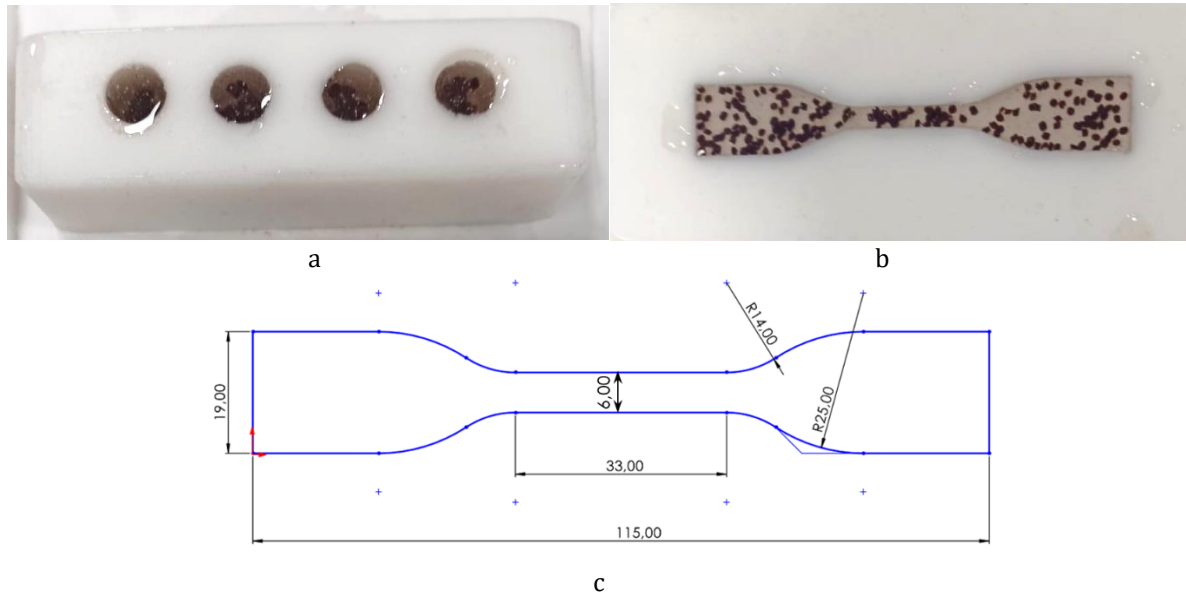
Denklem 1’e göre, %5 deri katkılı kompozitlerin teorik yoğunluğu 1,216 g/cm³ (doğal tabaklanmış deri) ve 1,220 g/cm³ (yağlı deri) olarak bulunmuştur. Numuneler; saf epoksi için E, yağlı deri takviyeli epoksi için YDTE, doğal tabaklanmış deri takviyeli epoksi için DDTE kısaltmalarıyla ifade edilmiştir. Çalışmada kullanılan malzemelerin özellikleri ve üretilen numunelerin bileşimleri Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Kullanılan malzemelerin özellikleri (Properties of the materials used)

Özellik	Matris	Takviye Malzeme	
	Epoksi	Doğal Tabaklanmış Deri	Yağlı Deri
Sertlik	80 Shore-D		
Yoğunluk (g/cm ³)	1,23	1,03	0,94
Kalınlık (mm)		1,8	1
Takviye çapı (mm)		2	2
Doğal deri takviyeli numunelerde bileşim oranı (%)	95	5	-
Yağlı deri takviyeli numunelerde bileşim oranı (%)	95	-	5

Epoksi reçine karışımlarında hava boşluklarını azaltmak ve deri takviye-matris ara yüzey bağıni iyileştirmek amacıyla, karıştırma sonrası vakum işlemi uygulanmıştır. Hazırlanan karışımlar, BIOMECH ECO-260 LAB cihazında $-0,75 \pm 0,05$ bar basınç altında 7 dakika süreyle bekletilmiştir. Deri lifli epoksi kompozitlerde $-0,7$ ila $-0,8$ bar aralığındaki vakum, kabarcıkların etkin şekilde uzaklaştırılmasını ve deri takviyenin gözenekli yapısının korunmasını sağlarken ara yüzey bütünlüğünü artırdığını bildiren çalışmalarla (Senthil vd., 2015; Alemu, 2021) uyumludur. $-0,9$ bar ve üzeri vakum seviyelerinde deri yapısındaki hava ve yağ fazlarının hızlı biçimde dışarı çıkması; yüzeyde ikincil kabarcık oluşumu gibi olumsuzluklara yol açabileceğinden bu sınırın üzerine çıkılmamıştır.

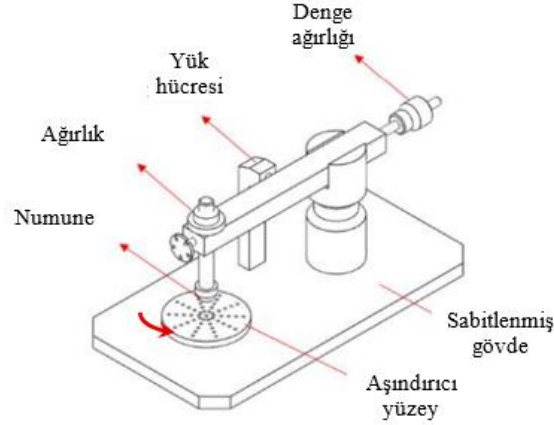
Aşınma testi için 10 mm çap ve 20 mm yüksekliğe sahip numuneler ile ASTM D 638-10 standardına göre tip IV çekme deney numunelerinin yerleştirildiği ön kalıplar Solidworks programında modellenmiştir. Pamukkale Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü Malzeme Mekanik Laboratuvarı'nda bulunan Ender Creality 3D yazıcılarda ön kalıplar yazdırılmıştır. Ön kalıpların içine 20 Shore D sertlikteki silikon dökülerek test numunelerinin kalıp boşlukları oluşturulmuştur. Hazırlanan silikon kalıplarda epoksi ve deri katkılı epoksilerden test numuneleri üretilmiştir (Şekil 1).



Şekil 1. Silikon kalıplarda üretilen test numuneleri a. Aşınma test numuneleri b. ASTM D638-10 Tip IV test numuneleri c. Çekme testi numune boyutları (ASTM D638 Tip IV) (Samples produced in silicone molds a. Wear test specimens b. ASTM D638-10 Type IV specimens c. Tensile test specimen dimensions (ASTM D638 Type IV))

Aşınma numuneleri ASTM G132-96 standardına uygun olarak TURKYUS marka aşınma test cihazında 600 numaralı zımpara kağıdı kullanılarak 3 m/s kayma hızında 60, 120 ve 180 s boyunca 5 N, 10 N ve 15 N yük ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 2). Aşınma deney parametreleri, literatürde yer alan benzer epoksi esaslı ve doğal lif/partikül takviyeli kompozitlerin tribolojik çalışmalarına uygun olarak seçilmiştir (Unal ve Mimaroglu, 2003). 600 numara SiC zımpara kağıdı, orta düzey pürüzlülükte bir karşı yüzey oluşturarak hem yüzey aşınmasını hem de sürtünme davranışını kontrollü biçimde değerlendirebilmek amacıyla tercih edilmiştir. Kayma hızı 3 m/s, polimer matrisli kompozitlerde adezif-abrazyon geçişinin belirginleştiği kritik hız aralığı olarak literatürde önerilmektedir. Numunelerin yüzey alanı ve epoksinin ortalama sertlik değeri (80 Shore D) dikkate alınarak temas basınçları 0,3-0,9 MPa aralığında kalacak şekilde yük uygulanmıştır. Bu değerler, malzemenin elastik sınırını

aşmadan kontrollü plastik deformasyon gelişimine izin vermektedir. Uygulanan 5 N, 10 N ve 15 N yük seviyeleri hem düşük hem orta hem de yüksek temas basınçlarını temsil edecek şekilde kademeli olarak seçilmiştir. Bu sayede, yük artışının aşınma mekanizmaları üzerindeki etkisi gözlemlenebilmiştir.



Şekil 2. Pin on disk aşınma test cihazı (Pin on disk wear test device) [Tan, 2023]

Deney süreleri 60, 120 ve 180 s olarak belirlenmiştir. Bu deney sürelerine karşılık gelen kayma mesafeleri 180 m, 360 m ve 540 m'dir. Böylece, zaman ve mesafe etkileri sistematik olarak incelenebilmiş; yüzeydeki aşınma rejimi geçişleri (mikro-oyulma, yığılma, film oluşumu vb.) belirlenmiştir. Özgül aşınma oranı (SWR) aşınma testi esnasında oluşan hacim kaybının, kayma mesafesi ve uygulanan kuvvetin çarpımına bölünmesi ile elde edilmiştir (Tan, 2023).

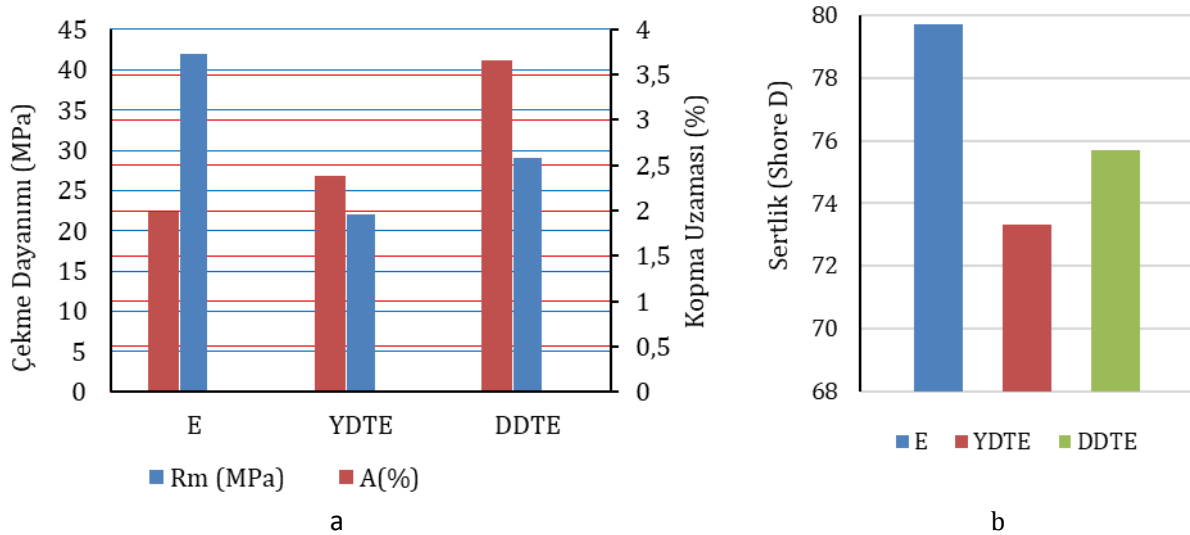
Çekme deneyleri, Pamukkale Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü Mekanik Laboratuvarı'nda bulunan WDW-100 çekme test cihazı kullanılarak 2 mm/dak çekme hızında gerçekleştirilmiştir. Çekme testleri için saf epoksi ve deri takviyeli epoksi gruplarından her biri için üçer numune üretilmiş ve toplam 9 adet çekme numunesi test edilmiştir. Aşınma deneyleri için ise her bir malzeme grubu ve her bir yük koşulu için dörder numune hazırlanmış; toplamda 36 adet aşınma numunesi üretilmiştir. Sertlik değerleri Tronic Durometer ile Shore D olarak ölçülmüştür. Yüzey pürüzlülükleri TMTECK-462 marka yüzey pürüzlülüğü cihazında ölçülmüştür.

Deri partikül takviyeli epoksi kompozitlerin mikroyapısal özellikleri, 15 N sabit yük altında ve 540 m kayma mesafesinde gerçekleştirilen kuru kayma koşullarındaki pin-on-disk testlerinin ardından Pamukkale Üniversitesi İleri Araştırma Laboratuvarında bulunan taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak 20.00 kV elektron yüksek gerilim (EHT), 9,9-10,0 mm çalışma mesafesi (WD) ve x1000 büyütme oranında incelenmiştir. Bu büyütme düzeyi, partiküllerin matris içerisindeki dağılım karakteristiğini ve makroskobik bağlanma yapılarını analiz etme imkânı sunmuştur.

4. Deneysel Sonuçlar (Experimental Results)

4.1 Çekme Testi ve Sertlik Ölçme Testi Sonuçları

ASTM D638-10 standardına göre üretilen çekme numunelerinin sonuçları, sol düşey ekseninde çekme dayanımı, sağ düşey ekseninde kopma uzaması olacak şekilde Şekil 3'te karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Saf epoksi (E) yaklaşık 42 MPa ile en yüksek çekme dayanımını göstermiştir. Yağlı deri takviyesiyle (YDTE) çekme dayanımı yaklaşık %48 oranında azalarak 22 MPa seviyesine düşmüş, doğal tabaklanmış deri takviyesinde (DDTE) ise yaklaşık %31 oranında azalarak 29-30 MPa aralığında gerçekleşmiştir. Bu dayanım kaybı, takviye partiküllerinin matris içinde tam homojen dağılmaması ve epoksi-deri ara yüzeyinde yeterli bağ oluşmamasına bağlı olarak ortaya çıkmıştır. Özellikle yağ içeriği yüksek crazy horse derilerinde epoksi ile etkileşimin zayıf kalması, ara yüzeyde gerilme yığılmalarını artırarak daha erken kopmaya yol açmıştır. Buna karşılık doğal tabaklanmış deride yağ fazının bulunmaması, ara yüzey tutunmasının görece olarak daha iyi olmasını sağlamış ve dayanımın YDTE'ye göre daha yüksek kalmasına katkı vermiştir. Ayrıca deri partiküllerinin epoksiye kıyasla daha düşük elastik modüle sahip olması, yük aktarım etkinliğini sınırlayan bir diğer etkidir.



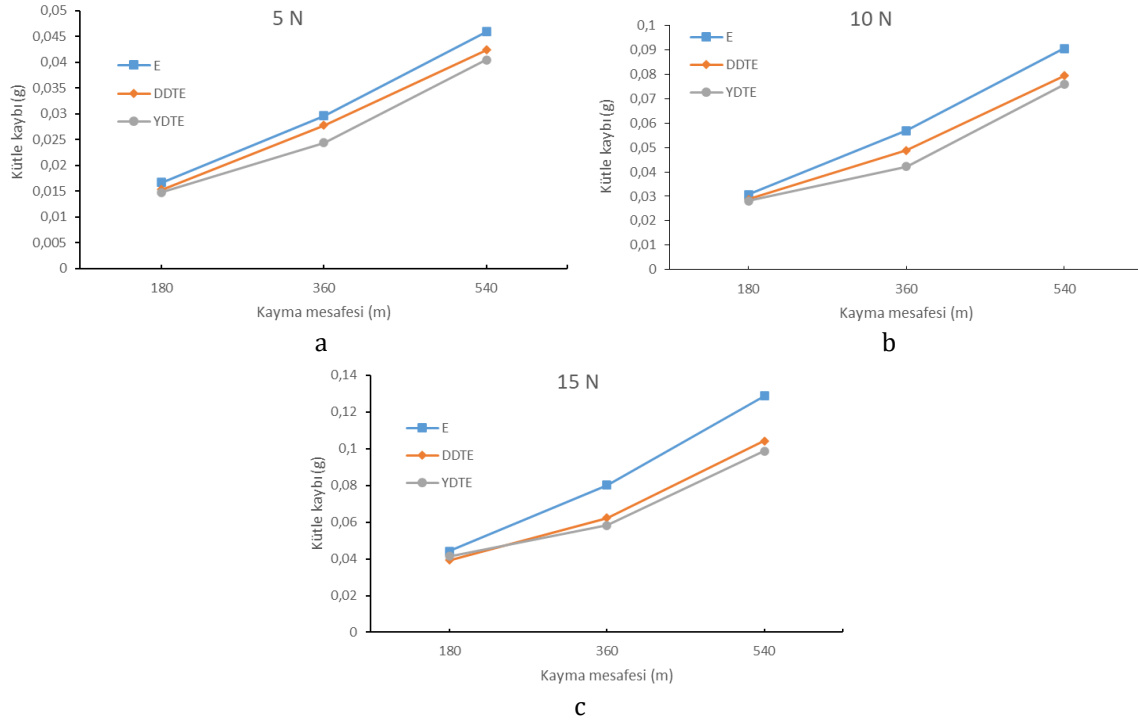
Şekil 3. Çekme Testi sonuçları (E: epoksi, YDTE: Yağlı deri takviyeli epoksi, DDTE: Doğal tabaklanmış deri takviyeli epoksi) a. Çekme dayanımı ve kopma uzaması, b. Sertlik (Shore D) (Tensile test results (E: epoxy, YDTE: oil-tanned leather reinforced epoxy, DDTE: naturally tanned leather reinforced epoxy) a. Tensile strength and elongation at break b. Hardness (Shore D))

Kopma uzaması değerleri, E için %1,97, YDTE için %2,3 ve DDTE için %3,66 olarak belirlenmiştir. Saf epoksinin düşük uzama ile kırılğan bir davranış sergilemesine karşın, deri takviyesi kompozitlerin deformasyon kapasitesini artırmıştır. Bu artış, deri partiküllerinin deformasyon sırasında enerji yutucu bir faz gibi davranması ve çatlak ilerlemesini yer yer saptırarak geciktiren mikro-bariyer etkisiyle açıklanabilir. Malzemenin kırılma enerjisi artarken, çekme dayanımı ara yüzey zayıflıkları ve sınırlı yük aktarımı nedeniyle düşmüştür.

Epoksi numunelerin sertlikleri ortalama 79,7 Shore D olarak ölçülürken, doğal tabaklanmış deri takviyeli numunelerin sertliği ortalama 75,7, Shore D yağlı deri takviyeli numunelerinki ise 73,3 Shore D olarak ölçülmüştür (Şekil 3.b). Deri takviyesinin sertlik değerini, DDTE numunelerde yaklaşık %5, YDTE numunelerde yaklaşık %8 oranında düşürdüğü görülmüştür. Sertlikteki bu azalma, kompozitlerin yüzey deformasyonuna daha yatkın hale gelmesine yol açmıştır.

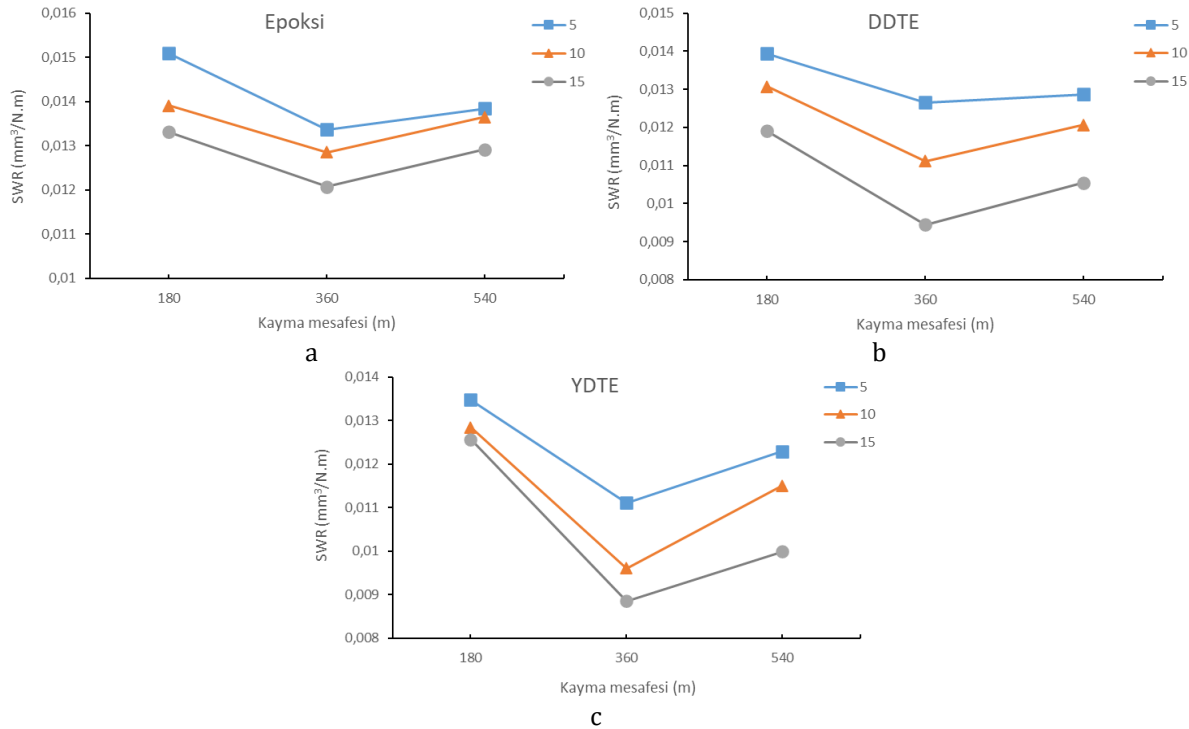
4.2 Aşınma Testi Sonuçları

5 N, 10 N ve 15 N yük altında, farklı kayma mesafelerinde ölçülen kütle kaybı değerleri karşılaştırmalı olarak Şekil 4'te verilmiştir. Tüm yük seviyelerinde kayma mesafesi 180 m'den 540 m'ye arttıkça kütle kaybının düzenli biçimde yükseldiği görülmektedir. Yük seviyeleri arasında kıyaslama yapıldığında (Şekil 4.a-c), aynı kayma mesafesinde kütle kaybının yük arttıkça belirgin şekilde yükseldiği gözlenmiştir. 540 m kayma mesafesinde kütle kaybı, 10 N yük uygulandığında 5N yük uygulanma durumuna göre epoksi numunelerde 1,97, doğal deri takviyeli numunelerde 1,88 ve yağlı deri katkılı numunelerde 1,87 kat artmıştır. 15 N yük uygulandığında kütle kaybında 5 N yük uygulanma durumuna göre epoksi numunelerde 2,8, DDTE numunelerde 2,46 ve YDTE numunelerde 2,44 kat artış bulunmuştur. Ayrıca her bir yük seviyesinde malzeme grupları genel olarak E > DDTE > YDTE sıralamasını izlemektedir. 5 N koşulunda gruplar arasındaki farklar sınırlı olmakla birlikte, 10 N ve özellikle 15 N'de ayrışma belirginleşmiş; saf epoksi numuneler en yüksek kütle kaybını verirken, deri takviyeli numunelerde kütle kaybının azaldığı görülmüştür. Yağlı deri takviyeli sistem (YDTE) tüm koşullarda en düşük kütle kaybı ile en avantajlı performansı göstermiştir. Bu sonuçlar, deri takviyesinin aşınmaya bağlı malzeme kaybını azaltabildiğini ve bu etkinin yüksek yüklerde daha görünür hâle geldiğini ortaya koymaktadır.



Şekil 4. Aşınma testi sonuçları a. 5 N yük altında kütle kaybı, b. 10 N yük altında kütle kaybı, c. 15 N yük altında kütle kaybı (Wear test results a. Mass loss under a 5 N load b. Mass loss under a 10 N load c. Mass loss under a 15 N load)

Şekil 5'te saf epoksi (E), doğal deri takviyeli epoksi (DDTE) ve yağlı deri takviyeli epoksi (YDTE) numunelerin özgül aşınma oranı (SWR) değerleri; 5 N, 10 N ve 15 N yük altında 180, 360 ve 540 m kayma mesafeleri için karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Tüm malzemelerde ortak eğilim, 180 m'den 360 m'ye geçişte SWR'nin azalması, 540 m'de ise yeniden artmasıdır. Bu davranış, aşınmanın başlangıç evresinde yüzey uyumlanması ile pürüzlerin kısmen düzleşmesi ve daha kararlı bir temas rejiminin oluşması; daha uzun mesafelerde ise yüzey/transfer tabakasının kısmen bozulması ve adezyon ile taşınan üçüncü-cisim (debris) etkilerinin artması ile ilişkilendirilebilir.

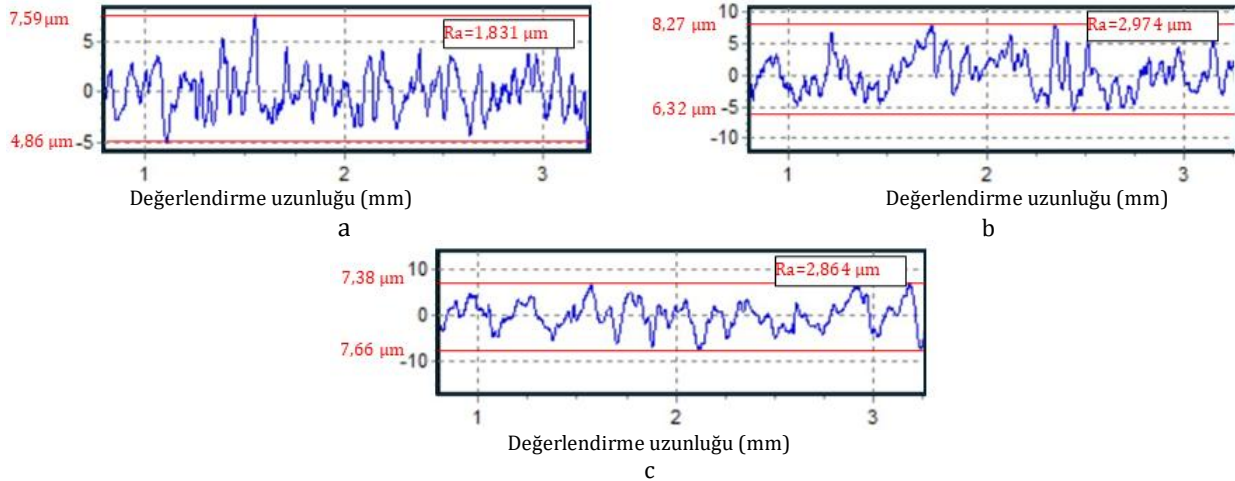


Şekil 5. Çeşitli kayma mesafelerinde özgül aşınma oranı, a. Epoksi numunelerin özgül aşınma oranı, b. Doğal deri takviyeli numunelerin özgül aşınma oranı, c. Yağlı deri takviyeli numunelerin özgül aşınma oranı (Specific wear rate at various sliding distances: a. Specific wear rate of epoxy samples b. Specific wear rate of naturally tanned leather–reinforced samples c. Specific wear rate of oil-tanned leather–reinforced samples)

Yük etkisi incelendiğinde, her üç malzeme grubunda da yük arttıkça SWR değerlerinin genel olarak daha düşük seviyelere indiği görülmektedir. Ayrıca malzemeler arası karşılaştırmada, deri takviyeli numunelerin SWR değerleri saf epoksiye göre daha düşük olup, tribolojik performansın takviye ile iyileştiğini göstermektedir. Bu iyileşme özellikle YDTE numunelerinde daha belirgindir: YDTE, tüm kayma mesafelerinde ve yüklerde çoğunlukla en düşük SWR seviyelerini vererek en iyi aşınma direncini sergilemiştir. DDTE numuneleri ise epoksiye kıyasla daha düşük SWR değerleri üretmekle birlikte YDTE'nin üzerinde kalmıştır. YDTE numunelerde yüzeyde oluşan ince yağlayıcı film, düşük sertliğe rağmen özgül aşınma oranında düşüşe neden olmuştur. Dolayısıyla takviyenin sürtünme sırasında "katı yağlayıcı" benzeri davranarak malzeme kaybını sınırladığı söylenebilir.

4.3 Yüzey Pürüzlülüğü Ölçüm Sonuçları

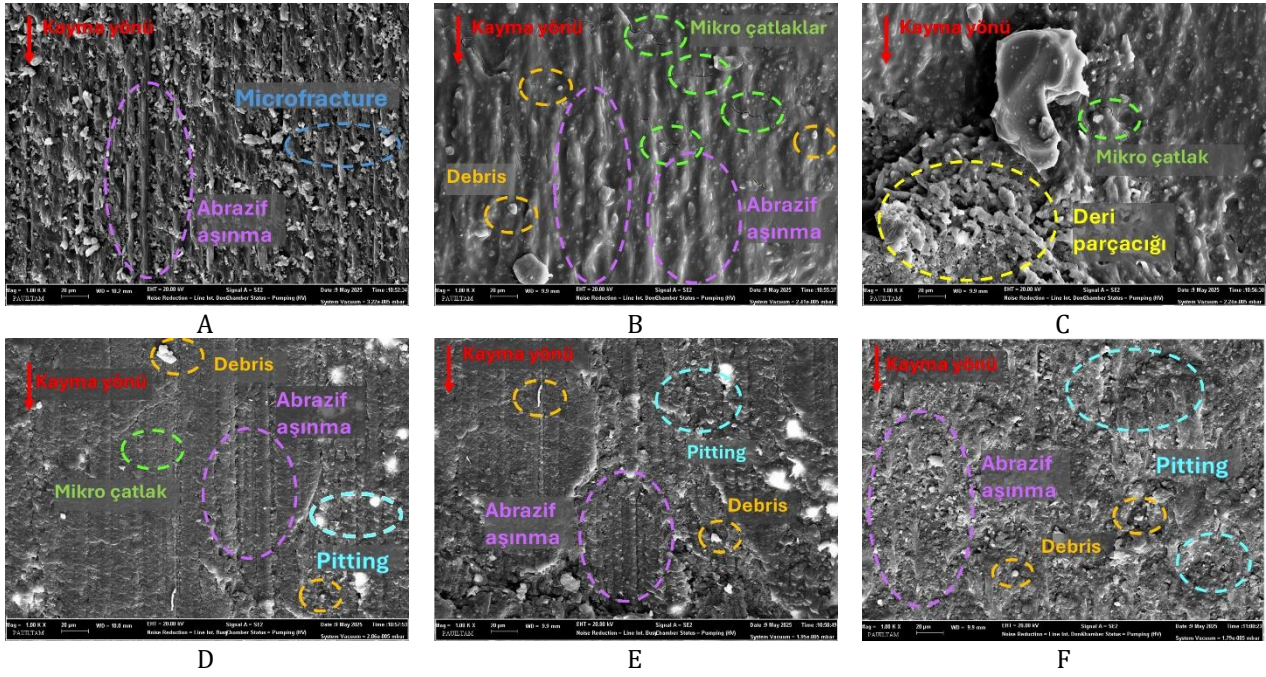
Şekil 6'da aşınma testi sonrası yüzey pürüzlülüğü profilleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Saf epoksi (E) numunede (Şekil 6.a) ölçülen ortalama pürüzlülük değeri $R_a = 1,831 \mu\text{m}$ olup, profil boyunca genlik değişimleri daha sınırlı ve daha düzenli bir topografyaya işaret etmektedir. Deri takviyeli numunelerde ise pürüzlülük belirgin şekilde artmıştır. Doğal tabaklanmış deri takviyeli epoksida (DDTE) $R_a = 2,974 \mu\text{m}$ (Şekil 6.b), yağlı deri takviyeli epoksida (YDTE) ise $R_a = 2,864 \mu\text{m}$ (Şekil 6.c) olarak ölçülmüştür. Bu sonuçlar, deri takviyesinin aşınma sonrası yüzeyde daha heterojen bir morfoloji oluşturduğunu göstermektedir. DDTE ve YDTE profillerinde, saf epoksiye kıyasla daha yüksek tepe-çukur dalgalanmaları dikkat çekmektedir. Bu durum, takviye partiküllerinin çevresinde farklı sertlikte bölgeler oluşması, partikül-matris ara yüzeyinde lokal kopmalar/oyulmalar ve aşınma artığı birikimi gibi etkilerle ilişkilendirilebilir. İki takviyeli grup birbirine yakın pürüzlülük değerleri vermekle birlikte, yağ fazı sürtünme sırasında yüzeyde kısmen "sıvanma/film" etkisi oluşturarak topografik düzensizlikleri sınırlamakta, dolayısıyla YDTE numuneler DDTE numunelere göre daha düşük yüzey pürüzlülüğü göstermektedir.



Şekil 6. Aşınma numunelerinin yüzey pürüzlülükleri a. Epoksi b. Doğal deri takviyeli epoksi c. Yağlı deri takviyeli epoksi (Surface roughness of the wear specimens a. Epoxy b. Naturally tanned leather-reinforced epoxy c. Oil-tanned leather-reinforced epoxy)

4.4 SEM Görüntüleri

Aşınma sonrası yüzey morfolojileri 15 N yük ve 540 m kayma mesafesinde SEM ile $\times 1000$ büyütmede incelenmiş ve Şekil 7'de sunulmuştur. Saf epoksi yüzeyinde (Şekil 7a) kayma yönüne paralel belirgin oluklanma/çizik izleri ve yüzeyde dağılmış debris (üçüncü cisim) gözlenmiştir. Yağlı deri takviyeli numunelerde (Şekil 7b-c) paralel mikro-oluklara ek olarak yer yer mikro-çatlak, malzeme yığılması ve ara yüzey ayrışması izleri görülmüştür. Doğal tabaklanmış deri takviyeli numunelerde (Şekil 7d-f) pullanma, delaminasyon, ara yüzey ayrılması ve özellikle bazı bölgelerde kopma izleri belirginleşmiştir. Deri partikül takviyesi epoksi matris içinde mikro-bariyer etkisi oluşturarak çatlak ilerlemesini zorlaştırmakta, yük transferini homojenleştirmekte ve malzeme kaybını azaltmaktadır. Deri partiküllerinden kopan ince tabakanın yüzeyde yeniden birikerek yağlayıcı bir film tabakası oluşturduğu ve bu tabakanın sürtünme katsayısını düşürdüğü belirlenmiştir. Buna karşın, yüksek yük altında film bütünlüğü bozulmuş, adeziv ve abrazyon mekanizmaları birlikte etkili olmuştur. Bu sonuçlar, makro ölçekte belirlenen düşük kütle kaybı ancak yüksek yüzey pürüzlülüğü değerleriyle tutarlıdır. Deri takviyeli kompozitlerdeki bu mikro-yapısal hasar biçimleri, epoksiye göre daha karmaşık ancak tribolojik olarak daha dirençli bir aşınma davranışının geliştiğini ortaya koymaktadır. Ancak ara yüzey bağının zayıf veya partikül dağılımının heterojen olduğu bölgelerde delaminasyon, kopma ve mikro-çatlak ilerlemesi gözlenmiştir.



Şekil 7. SEM görüntüleri a. Epoksi b ve c. Yağlı deri takviyeli epoksi x1000 d. e. ve f. Doğal tabaklanmış deri takviyeli epoksi x1000 (SEM micrographs a. Epoxy b and c. Oil-tanned leather-reinforced epoxy (×1000) d, e and f. Naturally tanned leather-reinforced epoxy (×1000))

5. Bulgular ve Tartışma (Result and Discussion)

Bu çalışmada, aksesuar üretimindeki delme işlemiyle oluşan doğal tabaklanmış ve yağlı (crazy horse) deri atıkları epoksi matrise takviye edilerek sürdürülebilir kompozitler geliştirilmiştir. Sonuçlar, deri partikül takviyesinin epoksinin hem mekanik hem tribolojik davranışını ve buna karşılık gelen mikroyapısal hasar biçimlerini belirgin biçimde değiştirdiğini ortaya koymuştur.

Çekme deneyleri, deri partikül takviyesinin epoksi matrisin yük taşıma kapasitesini azalttığını; buna karşın deformasyon kapasitesinde (süneklikte) sınırlı bir artış sağlayabildiğini göstermiştir. Saf epoksi numunelerde ortalama çekme dayanımı 42 MPa iken, doğal tabaklanmış deri takviyeli kompozitlerde 28,75 MPa, yağlı deri (crazy horse) takviyeli kompozitlerde ise 22 MPa olarak ölçülmüştür. Dayanımdaki düşüş, takviye partiküllerinin matris içinde tam homojen dağılmaması ve epoksi–deri ara yüzeyinde bağlanmanın sınırlı kalmasıyla uyumlu bir sonuçtur.

Literatürde farklı matris ve deri atığı türleriyle elde edilen mekanik performansın geniş bir aralıkta değiştiği görülmektedir. Doğal lif/partikül takviyeli polimer kompozitlerde ara yüzey bağının zayıf olmasının çekme dayanımını düşürdüğü ve gerilme yığılmaları nedeniyle çatlağın başlaması ve ilerlemesini kolaylaştırdığı bilinmektedir (John & Thomas, 2008; vd., 2001, Parisi vd., 2021; Kale vd., 2019). Bu nedenle, matris türü (silikon, doğal kauçuk, su bazlı poliüretan, TPU, epoksi), deri atığının kimyasal durumu (kromlu/kromsuz), parçacık morfolojisi ve uygulanan ön-işlem yöntemleri gibi değişkenler çekme davranışı üzerinde belirleyici role sahiptir (Ashokkumar vd., 2011; Ding vd., 2017; Liu vd., 2019; Ruiz vd., 2014; Senthil vd., 2014). Kromla tabaklanmış deri talaşı-polidimetilsiloksan (CS/PDMS) kompozitlerinde çekme dayanımı ve uzama değerleri oldukça düşüktür (Ashokkumar vd., 2011). Deri atık lifi ile hindistan cevizi lifi ve doğal kauçuk içeren (LF/CNF/NR) kompozitlerde çekme dayanımı iyileşirken; kopma uzaması değerlerindeki değişim sınırlıdır (Senthil vd., 2014). Su bazlı poliüretan–deri talaşı (WPU/LS) ve doğal kauçuk–karbon siyahı–deri talaşı (NR/CB/LS) kompozitlerinde ise benzer dayanım seviyeleriyle birlikte daha yüksek uzama değerleri elde edilebildiği belirtilmektedir (Ding vd., 2017; Ruiz vd., 2014). Deri takviyesinin “lif/kolajen demeti” formunda, iyi ayrıştırılmış ve homojen dağıtılmış olması durumunda kompozit numunelerin mekanik performansı yükselmektedir. Özellikle fiziksel ayrıştırma (ör. katı-hal kesme öğütme) ile kolajen demetlerinin açılması ve daha iyi dağılım sağlanması halinde hem dayanım hem uzama değerlerinin iyileştiği bulunmuştur (Liu vd., 2019). Kromlu deri atıklarının sıkıştırma kalıplama ile üretilen kompozitlerde ise yaklaşık 22 MPa çekme dayanımı bulunmuştur (Naderizadeh vd., 2025). Benzer şekilde, EVA–deri atığı sistemlerinde nano-katkılar ve optimizasyon yaklaşımlarıyla mekanik/fizikomekanik çıktının ayarlanabildiği belirlenmiştir (Sharma vd., 2022; Sharma vd., 2023). Bu çalışmada yağlı deri takviyeli (YDTE)

grubun daha düşük dayanım göstermesi, yağ fazının epoksi ile etkileşimi zayıflatması ve ara yüzde lokal gerilme birikimini artırması ile ilişkilendirilebilir.

Birçok çalışmada deri lifi/partikülü ilavesinin çekme dayanımı, elastisite modülü ve sertliği artırabildiği; buna karşın kopma uzamasında azalma ya da yalnızca sınırlı artışlar görülebildiği rapor edilmiştir (Parisi vd., 2021; Sharma vd., 2023; Hang vd., 2020; Raksaksri ve Phunpeng, 2022; Barrera Torres vd., 2025). Bu çalışmada ise dayanım düşüşüne rağmen kompozitlerin daha yüksek deformasyon kapasitesine ulaşabildiği görülmüştür. Saf epoksiye kıyasla yağlı deri takviyeli numunelerde kopma uzaması %22, doğal tabaklanmış deri takviyeli numunelerde ise %85 artmıştır. Literatürde de doğal takviyelerin elastik modülü düşürürken uzama/tokluk parametrelerini artırabildiği; etkinin lif/partikül boyutu, dağılım homojenliği ve ara yüzey kalitesi tarafından belirlendiği bildirilmektedir (Kılıç vd., 2020; Alemu, 2021). Dolayısıyla burada gözlenen eğilim, doğal takviyeli epoksi sistemlerinde sıkça rapor edilen “dayanım–tokluk dengesi” ile uyumludur (Naderizadeh vd., 2025). Bununla birlikte, çok yüksek uzama değerlerinin daha çok elastomerik/termoplastik matrislere özgüdür; nitekim kromlu deri atıklarının sıkıştırma kalıplama ile değerlendirildiği poliüretan matris deri takviyeli kompozitlerde %260 nihai uzama rapor edilmiştir (Naderizadeh vd., 2025). Kopma uzamalarındaki farklılıklar matris türündeki farklılıklara dayanmaktadır. Epoksi gibi termosetler yüksek rijitlik ve düşük uzama ile karakterize olduğundan, deri takviyesi çoğu zaman “yük taşıyan” bir fazdan ziyade heterojen bir ikinci faz gibi davranarak dayanım–tokluk dengesini yeniden şekillendirebilir (Kale vd., 2019; Surana vd., 2020). Buna karşılık TPU, EVA, LLDPE gibi termoplastikler ile NR/NBR gibi elastomerler daha yüksek deformasyon kapasitesi sunduğundan, deri atığı takviyesiyle daha yüksek kopma uzaması değerlerine ulaşılabilirdiği raporlanmıştır (Noyon vd., 2022; Raksaksri ve Phunpeng, 2022; Hang vd., 2020; Guo vd., 2021). Örneğin kromlu deri talaşının PDMS ile birleştirildiği CS/PDMS kompozitlerinde hem dayanım hem uzamanın düşük kaldığı bildirilirken (Ashokkumar vd., 2011), NR/WPU gibi daha sünek sistemlerde uzama kabiliyetinin daha yüksek değerlere çıkabildiği görülmektedir (Ruiz vd., 2014; Ding vd., 2017).

Sertlik (Shore D) değerleri, saf epoksiye göre deri takviyeli kompozitlerde %5–8 aralığında azalmıştır. Sertlikteki azalmaya rağmen tribolojik performansın iyileşebilmesi, polimer kompozitlerde aşınma davranışının yalnızca sertlik tarafından değil, yüzeyde oluşan transfer/tribofilm tabakası ve ara yüzey etkileşimleri tarafından da kontrol edilebildiğini gösteren literatürle uyumludur (Kishore vd., 2000; Unal ve Mimaroglu, 2003; Senthil vd., 2015). Deri takviyeli numunelerde çekme dayanımındaki düşüş ve kopma uzamasındaki artış ile sertlik değerlerinin düşmesi sonuçları uyumludur.

Aşınma testlerinde, tüm yük koşullarında deri takviyeli kompozitler saf epoksiye kıyasla daha düşük kütle kaybı sergilemiş; kütle kaybı genel olarak $E > DDTE > YDTE$ sıralamasını izlemiştir. Yağlı deri takviyesi (YDTE), tüm koşullarda en düşük kütle kaybı ile en avantajlı performansı göstermiştir. Bu sonuç, deri esaslı takviyelerin, epoksi ve poliüretan matrisli sistemlerde aşınma oranını düşürdüğünü ortaya koyan literatürdeki çalışmalarla uyumludur (Senthil vd., 2015; Gong vd., 2022; Naderizadeh vd., 2025).

Özgül aşınma oranı (SWR), deri takviyesi ile saf epoksiye göre düşmüş ve YDTE numuneleri en düşük SWR seviyelerini vermiştir. Bu sonuç, deri takviyesinin tribolojik performansı iyileştirdiğini bildiren çalışmalarla uyumludur (Senthil vd., 2015; Gong vd., 2022). Tüm numunelerde SWR’nin 180 m’den 360 m’ye geçişte azalması ve 540 m’de yeniden artması, tipik bir yüzey uyumu/film oluşumu safhası ve daha uzun mesafelerde film bütünlüğünün bozulması ve üçüncü-cisim etkisinin artmasıyla açıklanmaktadır. YDTE’nin çoğu koşulda en düşük SWR değerlerini vermesi, yağ fazının tribofilm kararlılığını artırmasıyla tutarlıdır ve literatürde bildirilen “film kontrollü aşınma” mekanizmasıyla uyum göstermektedir (Senthil vd., 2015). %30 deri takviyeli 3D ve kalıplama ile üretilen TPU numunelerin aşınma yüzeylerinde daha az çizik bulunduğu ve aşınma direncinin arttığı rapor edilmiştir (Naderizadeh vd., 2025).

Yüzey pürüzlülüğü (Ra), saf epoksiden (1,831 μm) deri takviyeli numunelere geçişte 2,8–3,0 μm aralığına yükselmiştir. Pürüzlülükteki artış, deri partiküllerinin heterojen dağılımı, partikül çevresinde yerel kopmalar/mikro-oyulmalar ve yüzeyde topografik farklılaşma ile ilişkilidir. Pürüzlülükteki artışa karşın kütle kaybı ve SWR’nin azalması, pürüzlülüğün aşınma kaybıyla her koşulda paralel değişmeyebileceğini; yüzey film/transfer tabakası etkisinin belirleyici olabildiğini gösteren literatürle uyumludur (Unal ve Mimaroglu, 2003; Tan, 2023).

Mikroyapısal (SEM) incelemeler, saf epoksidede belirgin abrazyon çiziklerini; yağlı deri takviyeli kompozitlerde plastik deformasyon, ara yüzey ayrılması ve malzeme yığılmalarını; doğal tabaklanmış deri takviyeli kompozitlerde ise pullanma ve takviye kopması gibi karma hasar izlerini ortaya koymuştur. Bu hasar morfolojileri, doğal lif/partikül takviyeli epoksi kompozitlerde bildirilen karma aşınma davranışlarıyla uyumludur (Rout vd., 2001; Kishore vd., 2000). Deri liflerinin polimer kompozitlerde aşınma oranını düşürebildiğine dair bulgular, farklı matrislerde de benzer mekanizmalara işaret eder (Senthil vd., 2014; Ding vd., 2017; Ruiz vd., 2014).

Elde edilen sonuçlar, epoksi gibi kırılğan bir termosette iri partikül (%5, ~2 mm çapta silindirik) deri takviyesinin mekanik dayanımı düşürürken kopma uzamasını artırabildiğini ortaya koyarak ara yüzey dayanımı ve dağılım homojenliğinin belirleyici rolünü doğrulamıştır. Ayrıca triboloji açısından yağlı deri (YDTE) ile doğal tabaklanmış deri (DDTE) arasındaki fark görünür hâle gelmiş; yağ fazının olası sınır yağlama ve tribofilm stabilizasyonu etkisiyle YDTE'nin kütle kaybı ve SWR bakımından daha avantajlı performans sergileyebildiği gösterilmiştir. Bu bulgu, tribolojik performansın yalnızca sertlik gibi tekil bir parametreyle değil, yüzey film oluşumu ve debris dinamiğiyle birlikte belirlendiğini ortaya koyan klasik yaklaşımla örtüşmektedir (Kishore vd., 2000; Unal & Mimaroglu, 2003).

6. Sonuçlar ve Değerlendirme (Conclusions)

Bu çalışma, aksesuar üretiminde delme işlemleriyle oluşan doğal tabaklanmış ve yağlı (crazy horse) deri atıklarının epoksi matriste değerlendirilmesiyle, atık değerlendirme yaklaşımını mekanik-tribolojik performans metrikleriyle birlikte ortaya koymuştur. Doğal tabaklanmış ve yağlı (crazy horse) deri delme atıkları, epoksi matrise %5 (ağırlıkça) partikül takviyesi olarak başarıyla entegre edilmiştir.

- Çekme dayanımı saf epoksida 42 MPa, DDTE'de 28,75 MPa, YDTE'de 22 MPa olarak ölçülmüştür. Deri takviyesi ile çekme dayanımı düşmektedir.
- Kopma uzaması epoksi numunelerde %1,97, YDTE numunelerde %2,30 ve DDTE numunelerde %3,6 olarak bulunmuştur. Deri takviyesi sünekliği artırmıştır.
- Epoksi numunelerde 79,7. DDTE numunelerde 75,7 ve YDTE numunelerde 73,3 SHORE D sertlik değeri elde edilmiştir. Deri takviyesi sertliği %5–8 azaltmıştır.
- Aşınma deneylerinde kütle kaybı sıralaması genel olarak E > DDTE > YDTE şeklindedir. YDTE en düşük kütle kaybını vermiştir.
- SWR değerleri deri takviyesiyle düşmüş ve YDTE çoğu koşulda en düşük SWR ile en iyi tribolojik performansı göstermiştir.
- SEM analizleri, saf epoksida abrazyon izlerini; deri takviyeli numunelerde ise plastik deformasyon, ara yüzey ayrılması, pullanma (pitting) ve takviye eleman kopmasını içeren karma aşınma mekanizması doğrulanmıştır.

Tribolojik açıdan ise deri takviyesi nin sağladığı iyileşmenin, yağ fazından kaynaklandığının doğrulanması için sürtünme katsayısı (CoF) ve tribofilm kimyası gibi ek çıktılar gereklidir. Bununla birlikte, mevcut kompozitlerde partikül boyutunun görece büyük olması ve dağılım heterojenliği, çekme dayanımındaki düşüşün başlıca sınırlayıcı faktörü olarak öne çıkmıştır. Dolayısıyla bu çalışma, deri atığının epoksi sisteminde tribolojik performans açısından uygun bir takviye alternatifi olabileceğini ortaya koymaktadır. Bununla birlikte mekanik dayanımın korunması için partikül boyutu, homojen takviye eleman dağılımı ve ara yüzey bütünlüğü üzerinde sistematik iyileştirmeler yapılması gerekmektedir.

Teşekkür (Acknowledgement)

Bu çalışmanın hazırlanmasında destek olan Ali İncaoğlu Deri & Tekstil Ürünleri San. ve Tic. Ltd. Şti.'ne teşekkür ederiz.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

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

Kaynaklar (References)

- Alemu, K., Assefa, T., Debebe, A., Solomon, B., & Hailu, Y. (2021). Goods reinforcement from waste leather, fabric, and low-density polyethylene by using plant binder. *Polymer Composites*, 42(6), 2787–2794.
- Ambone, T., Joseph, S., Deenadayalan, E., Mishra, S., Jaisankar, S., & Saravanan, P. (2017). Polylactic acid (PLA) biocomposites filled with waste leather buff (WLB). *Journal of Polymers and the Environment*, 25, 1099–1109.
- Ashokkumar, M., Thanikaivelan, P., & Chandrasekaran, B. (2011). Modulating chromium containing leather wastes into improved composite sheets using polydimethylsiloxane. *Polymers and Polymer Composites*, 19, 497–504.
- Bai, L., Qv, P., & Zheng, J. (2020). Colorless, transparent, and healable silicone elastomers by introducing Zn(II)–carboxylate interactions via aza-Michael reaction. *Journal of Materials Science*, 55, 14045–14057.
- Barrera Torres, G., Gutierrez Aguilar, C. M., R. Lozada, E., Tabares Montoya, M. J., Ángel Álvarez, B. E., Sánchez, J. C., ... Santos, R. J. (2025). Application of post-industrial leather waste for the development of sustainable rubber composites. *Polymers*, 17(2), 190.

- Carleo, F., Plagge, J., Whear, R., Busfield, J., & Klüppel, M. (2020). Modeling the full time-dependent phenomenology of filled rubber for use in anti-vibration design. *Polymers*, 12, 841.
- Chand, N., Fahim, M., & Hashmi, S. A. R. (2000). Dry sliding wear of oil palm fiber reinforced polyester composites. *Wear*, 242(1–2), 38–46.
- Chaturvedi, D., & Sultan, T. (2025). Recycled leather and sawdust composite sheets. *Transactions on Engineering and Computing Sciences*, 13(3), 18–27.
- Dargazany, R., & Itskov, M. (2013). Constitutive modeling of the Mullins effect and cyclic stress softening in filled elastomers. *Physical Review E*, 88, 012602.
- Ding, C., Zhang, M., Dai, L., Qi, Y., Shi, R., & Yang, J. (2017). Fabrication and characterization of regenerated leather using chrome shavings as raw materials. *Journal of the American Leather Chemists Association*, 112(5).
- Fan, Z., Lu, L., Sang, M., Wu, J., Wang, X., Xu, F., ... Xuan, S. (2023). Wearable safeguarding leather composite with excellent sensing, thermal management, and electromagnetic interference shielding. *Advanced Science*, 10(26), 2302412.
- Fan, Z., Zhao, C., Wu, J., Cai, Y., Zhou, J., Zhang, J., Gong, X., & Xuan, S. (2022). Intelligent safeguarding leather with excellent energy absorption via the toughness-flexibility coupling designation. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 161, 107078.
- Gong, D., Han, Y., Zhang, Q., Xu, B., Zhang, C., Li, K., & Tan, L. (2022). Development of leather fiber/polyurethane composite with antibacterial, wet management, and temperature-adaptive flexibility for foot care. *ACS Biomaterials Science & Engineering*, 8(10), 4557–4565.
- Guo, J., Dai, R., Chen, H., Liang, Y., & Shan, Z. (2021). Research on the composite and functional characteristics of leather fiber mixed with nitrile rubber. *Journal of Leather Science and Engineering*, 3(1), 10.
- Hang, L. T., Viet, D. Q., Linh, N. P. D., Doan, V. A., Dang, H. L. T., Dao, V. D., & Tuan, P. A. (2020). Utilization of leather waste fibers in polymer matrix composites based on acrylonitrile-butadiene rubber. *Polymers*, 13(1), 117.
- John, M. J., & Thomas, S. (2008). Biofibres and biocomposites. *Carbohydrate Polymers*, 71(3), 343–364.
- Joseph, S., Ambone, T. S., Salvekar, A. V., Jaisankar, S., Saravanan, P., & Deenadayalan, E. (2017). Processing and characterization of waste leather based polycaprolactone biocomposites. *Polymer Composites*, 38, 2889–2897.
- Kale, R. D., & Jadhav, N. C. (2019). Utilization of waste leather for the fabrication of composites and to study its mechanical and thermal properties. *SN Applied Sciences*, 1, 1–9.
- Kanagy, J. R., & Wallace, E. L. (1943). Density of leather and its significance. *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, 31, 169–179.
- Kılıç, E., Tarrés, Q., Delgado-Aguilar, M., Espinach, F. X., Fullana-i-Palmer, P., & Puig, R. (2020). Leather waste to enhance mechanical performance of high-density polyethylene. *Polymers*, 12(9), 2016.
- Kishore, Satapathy, B. K., & Mahajan, D. K. (2000). Abrasive wear behavior of short glass fibre reinforced phenolic composites. *Wear*, 237(1), 20–27.
- Kodaloğlu, M., & Kodaloğlu, F. A. (2024). Environmentally-friendly recycled leather reinforced composite: Thermal and acoustic properties. *Teknik Bilimler Dergisi*, 14(2), 29–34.
- Li, Q., Wang, Y., Xiao, X., Zhong, R., Liao, J., Guo, J., ... Shi, B. (2020). Research on X-ray shielding performance of wearable Bi/Ce-natural leather composite materials. *Journal of Hazardous Materials*, 398, 122943.
- Liu, B., Li, Y., Wang, Q., & Bai, S. (2019). Green fabrication of leather solid waste/thermoplastic polyurethanes composite: Physically de-bundling effect of solid-state shear milling on collagen bundles. *Composites Science and Technology*, 181, 107674.
- Meşe, P., Karaağaç, B., & Uyanık, N. (2014). Kromla tabaklanmış deri katkısının etilen propilen dien monomer kauçuğuna etkisinin incelenmesi. In *2. Uluslararası Katılımlı Kauçuk Kongresi* (p. 36).
- Meşe, P., Karaağaç, B., & Uyanık, N. (2018). Investigating effect of chrome tanned leather scraps in ethylene propylene diene monomer rubber. *Progress in Rubber Plastics and Recycling Technology*, 34(2), 89–103.
- Naderizadeh, S., Faggionato, A., Nazir, M., Mascolo, R., Hassan, M., Bilotti, E., & Busfield, J. (2025). The thermal and mechanical performance of leather waste-filled bio-based thermoplastic polyurethane composites. *Polymers*, 17(9), 1202.
- Nassef, M., Elbasyoni, A. M., Badr, A. A., Alnahrawy, A., & Hassanin, A. H. (2022). Manufacturing and utilization of novel sustainable composites using pulled wool fibers waste from leather tanneries: Mechanical, physical, and dynamic characterization. *Journal of Industrial Textiles*, 51(4_suppl), 5708S–5727S.
- Noyon, M. A. R., Dey, T. K., Jamal, M., Rathanasamy, R., Chinnasamy, M., & Uddin, M. E. (2022). Fabrication of LLDPE based biodegradable composite incorporated with leather shavings and buffing dust: An approach for waste management. *Journal of Applied Polymer Science*, 139(47), e53184.
- Parisi, M., Nanni, A., & Colonna, M. (2021). Recycling of chrome-tanned leather and its utilization as polymeric materials and in polymer-based composites: A review. *Polymers*, 13(3), 429.
- Raksakri, L., & Phunpeng, V. (2022). Leather-like composite materials prepared from natural rubber and two leather wastes: Wet blue leather and finished leather. *Journal of Elastomers & Plastics*, 54(8), 1254–1276.
- Ramaraj, B. (2006). Mechanical and thermal properties of ABS and leather waste composites. *Journal of Applied Polymer Science*, 101(5), 3062–3066.
- Rout, A. K., Satapathy, A., Mishra, S. C., & Pal, S. K. (2001). Studies on the wear behavior of polymer composites reinforced with natural fibers. *Polymer Composites*, 22(4), 468–476.
- Ruiz, M. R., Budenberg, E. R., da Cunha, G. P., Bellucci, F. S., da Cunha, H. N., & Job, A. E. (2015). An innovative material based on natural rubber and leather tannery waste to be applied as antistatic flooring. *Journal of Applied Polymer Science*, 132(3).
- Senthil, R., Hemalatha, T., Kumar, B. S., Uma, T. S., Das, B. N., & Sastry, T. P. (2014). Recycling of finished leather wastes: A novel approach. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 17, 187–197.
- Senthil, R., Vedakumari, S. W., Hemalatha, T., Das, B. N., & Sastry, T. P. (2015). Leather fibres as reinforcement for epoxy composites: A novel perspective. *Fibers and Polymers*, 16(1), 181–187.
- Sharma, S., Sudhakara, P., Petru, M., Singh, J., & Rajkumar, S. (2022). Effect of nanoadditives on the novel leather fiber/recycled poly(ethylene-vinyl-acetate) polymer composites for multifunctional applications: Fabrication, characterizations, and

- multiobjective optimization using central composite design. *Nanotechnology Reviews*, 11, 2366–2432.
- Sharma, S., Sudhakara, P., Singh, J., Mr, S., & Siengchin, S. (2023). Fabrication of novel polymer composites from leather waste fibers and recycled poly(ethylene-vinyl-acetate) for value-added products. *Sustainability*, 15(5), 4333.
- Sivakumar, V., & Mohan, R. (2020). Sustainable solid waste management in leather and textile industry: Leather & textile waste fibre-polymer composite and nanocomposite–Overview and review. *Textile & Leather Review*, 3(2), 54–63.
- Surana, I., Bedi, H. S., Bhinder, J., Ghai, V., Chauhan, A., & Agnihotri, P. K. (2020). Compression and fracture behavior of leather particulate reinforced polymer composites. *Materials Research Express*, 7(5), 054006.
- Surianarayanan, P., Balaji, N., & Balasubramanian, K. (2024). Effect of silane-treated chitosan carbohydrate polymer and tanned leather/areca fiber hybrid epoxy composites on mechanical, drop load, and fatigue properties. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 14(16), 19093–19106.
- Şaşmaz, S. (2016). *Kromla tabaklanmış deri atıklarının doğal kauçuk ve stiren-bütadien kauçuğuna etkisinin incelenmesi* (Yüksek lisans tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Tan, E. (2023). Experimentally assessing the wear characteristics of 3D-printed PLA and tough PLA materials based on fused deposition modeling. *Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 9(2), 213–226.
- Tauhiduzzaman, M., Mottalib, M. A., Rahman, M. J., & Kalam, M. A. (2024). Preparation and characterization of composite sheets from solid leather waste with plant fibers: A waste utilization effort. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 26(4), 1025–1038.
- Teklay, A., Gebeyehu, G., Getachew, T., Yaynshet, T., & Sastry, T. P. (2017). Preparation of value added composite boards using finished leather waste and plant fibers—a waste utilization effort in Ethiopia. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 19(5), 1285–1296.
- Unal, H., & Mimaroglu, A. (2003). Friction and wear performance of polyamide 6 and graphite and wax polyamide 6 composites. *Wear*, 255(7–12), 751–757.
- Wijayarathna, E. K. B., Svensson, S. E., Sar, T., & Zamani, A. (2025). Multilayer biocomposite vegan leather materials derived from vegetable-tanned fungal biomass cultivated on food waste. *Scientific Reports*, 15(1), 15366.