

Taşıt Fren Balatalarının Geliştirilmesinde Kullanılan Bitkisel Elyaf İçeren Türleri ve Frenleme Performanslarına Etkileri

Halil Öz^{1*}, Hicri Yavuz² ve Hüseyin Bayrakçeken³

¹Department of Automotive Engineering, Institute of Science, Afyon Kocatepe University, Afyon, 03200, Türkiye

²Department of Engine Vehicles and Transportation Technology, Vocational School of Afyon, Afyon Kocatepe University, Afyon, 03200, Türkiye

³Department of Automotive Engineering, Faculty of Technology, Afyon Kocatepe University, Afyon, 03200, Türkiye

Özet

Fren sistemleri, motorlu taşıtlarda güvenliğin sağlanmasında kritik bir rol oynayan, aracın hızını azaltmak veya tamamen durdurmak amacıyla çalışan mekanik ve termal sistemlerdir. Bu sistemlerin en önemli bileşenlerinden biri olan fren balataları, sürtünme yoluyla kinetik enerjiyi ısı enerjisine çevirerek aracın yavaşlamasını sağlar. Geleneksel fren balataları; bağlayıcı reçineler, sürtünme düzenleyici katkıları, dolgu malzemeleri, aşındırıcılar ve lif takviyeleri gibi çeşitli bileşenlerden oluşmaktadır. Son yıllarda, çevresel kaygılar ve insan sağlığı üzerindeki olumsuz etkiler nedeniyle, fren balatalarında kullanılan sentetik veya toksik liflerin yerini alabilecek doğal elyaflara yönelik ilgi artmıştır. Tarımsal atıklar veya yenilenebilir bitkisel kaynaklardan elde edilen doğal lifler; düşük yoğunlukları, biyobozunur yapıları ve yeterli mekanik özellikleri sayesinde sürdürülebilir malzeme alternatifleri arasında öne çıkmaktadır. Doğal liflerin fren balatalarında kullanımı, sadece fren performansını iyileştirmekle kalmayıp aynı zamanda çevresel etkileri azaltarak sürdürülebilirlik hedeflerine katkı sağlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Aşınma oranı; Doğal lifler, Fren balatası, Fren diski, Polimer bilimi, Sürtünme katsayısı, Taşıt teknolojisi
<http://dx.doi.org/10.29228/pastech.89078>

Types of Plant Fibers Used in the Development of Vehicle Brake Pads and Their Effects on Braking Performance

Abstract

Brake systems play a critical role in ensuring safety in motor vehicles, operating as mechanical and thermal systems designed to reduce the speed of the vehicle or bring it to a complete stop. One of the most important components of these systems is the brake pad, which slows down the vehicle by converting kinetic energy into heat energy through friction. Conventional brake pads are composed of various ingredients, including binder resins, friction modifiers, fillers, abrasives, and fiber reinforcements. In recent years, due to environmental concerns and the adverse effects on human health, there has been a growing interest in using natural fibers as alternatives to synthetic or toxic fibers in brake pads. Natural fibers obtained from agricultural waste or renewable plant-based sources stand out as sustainable material alternatives due to their low density, biodegradable nature, and adequate mechanical properties. The use of natural fibers in brake pad applications not only improves braking performance but also contributes to sustainability goals by reducing environmental impact.

Keywords: Wear rate, Natural fibers, Brake pad, Brake disc, Polymer science, Coefficient friction, Vehicle technology

1. Giriş

Her türlü kara taşıtında fren sistemi, yolcu ve sürücü güvenliğini doğrudan etkileyen en kritik sistemlerden biri olarak kabul edilmektedir. Fren sisteminin temel işlevi, hareket hâlindeki bir aracın kinetik enerjisini kontrollü bir şekilde ısı enerjisine dönüştürerek aracın hızını azaltmak veya aracı tamamen durdurmaktır. Bu süreçte frenleme kuvvetinin etkin, dengeli ve zamanında uygulanması büyük önem taşır [1]. Dolayısıyla fren sisteminin yüksek güvenilirliğe sahip olması ve fren performansının, aracın kullanım ömrü boyunca korunması gereklidir [2]. Ayrıca, frenleme performansının farklı

yol koşullarında, değişken sıcaklık ve nem gibi atmosferik çevre koşullarında da istikrarlı bir şekilde devam etmesi beklenmektedir [3]. Bu bağlamda, fren sisteminde kullanılan malzemelerin termal, mekanik ve tribolojik özellikleri büyük önem taşımakta; sistemin tasarımı ve malzeme seçimi, güvenli ve uzun ömürlü frenleme performansı açısından belirleyici rol oynamaktadır [4,5].

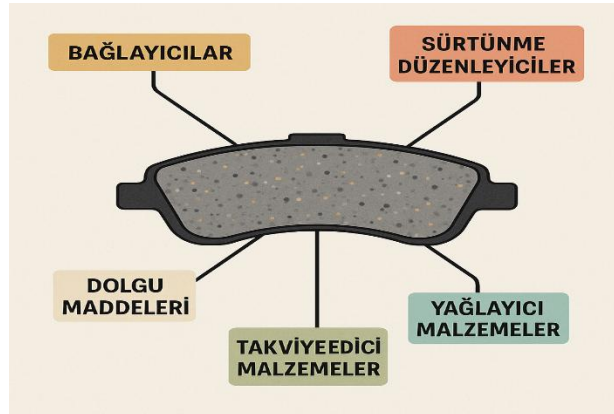
Fren sistemleri, 1902'de New York'taki bir yarışmada Ransom E. Olds'un tek bantlı arka aks frenini denemesiyle önemli bir dönüm noktasına ulaştı; bu test, hem harici frenlerin sorunlarını aşan dahili kampana frenlerin gelişimine yol açtı hem de 1950'lerde Avrupa'da standart hale gelen, ancak kökeni 1898'de Elmer Ambrose Sperry'nin elektrikli otomobili için tasarladığı Amerikan icadı olan disk frenlerin ortaya çıkışına zemin hazırladı [6,7]. Bu süreçte, 1907'de Herbert Froad'un asbestli balataları kullanma fikriyle gürültü sorunu çözülürken, 1918'de Malcolm Loughheed'in hidrolik sistemleri frenlemeye uygulamasıyla frenleme gücü ve verimliliği artırılarak günümüzdeki ileri sistemlerin temelleri atıldı [8,9].

Herbert Froad, 1897'de katran çözeltisine batırılmış pamuktan oluşan ilk fren balatası malzemesini icat etti [7]. Ardından, İngiliz mühendis Frederick William Lanchester, disk freni icat etti. 1903 yılında, Renault ve Mercedes gibi otomobil şirketleri, mevcut fren sisteminin (disk fren) tasarımında bir varyasyon sundu ve bu da kampana frenin gelişimine yol açtı [10]. Fren diski veya kampanası, fren sisteminin en kritik bileşenlerinden biridir ve fren aşınmasının çoğuna (%70) neden olur [11]. Bu nedenle, bu parçaların yüksek mukavemet, aşınma direnci, termal iletkenlik, düşük termal genişleme ve termal kararlılık gibi üstün özelliklere sahip olması şarttır [12]. Günümüzde fren diski ve kampana üretiminde yaygın olarak kullanılan malzemeler beş ana grupta toplanır: gri dökme demir, çelik, karbon bazlı, alüminyum bazlı ve seramik bazlı malzemeler [13,14].

Bu çalışmada, fren balatalarında kullanılan takviye edici malzemeler, yalnızca performans değil, aynı zamanda sürdürülebilirlik, geri dönüşüm ve çevresel etkiler açısından da değerlendirilecektir. Geleneksel cam elyafı, aramid ve asbest gibi malzemeler yüksek performans sunsa da çevreye zararlı üretim süreçleri, geri dönüştürülemez olmaları ve biyolojik olarak parçalanmamaları nedeniyle çevresel açıdan sorunludur. Bu nedenle, yenilenebilir, biyobozunur ve düşük karbon ayak izine sahip doğal lifler (örneğin jüt, kenaf, sisal, hindistancevizi, bambu vb.), çevre dostu alternatifler olarak öne çıkmaktadır. Doğal lifler, uygun yüzey işlemleri sonrası fren balatalarının mekanik, termal ve tribolojik özelliklerini iyileştirebilmekte; aynı zamanda atık yönetimi, düşük maliyet ve yerel kaynakların değerlendirilmesi açısından da avantaj sunmaktadır. Bu bağlamda, çalışmamızda doğal liflerin fren balatalarında kullanım potansiyeli çok boyutlu olarak incelenerek hem teknik performans hem de çevresel sürdürülebilirlik açısından malzeme seçimine katkı sağlanacaktır. Ayrıca, deneysel çalışmaların sonuçlarını yorumlamak ve farklı malzemelerin davranışlarını tahmin etmek için bir çerçeve sunarak, alandaki bilimsel anlayışın derinleşmesine katkıda bulunacaktır.

2. Fren Balatası Malzemelerinin Genel Tanımı ve Bileşenleri

Fren balataları, aracın güvenli bir şekilde yavaşlaması ve durması için hayati önem taşıyan, sürtünme, ısı ve basınca dayanıklı kompozit malzemelerden üretilir. Bu balatalar genellikle; tüm bileşenleri bir arada tutan ve kalıplanmasını sağlayan fenolik reçineler gibi bağlayıcılardan [15]; iyi frenleme performansı sağlayan alümina ve silikon karbür gibi aşındırıcılar ile aşırı sürtünmeyi ve gürültüyü azaltan grafit ve molibden disülfür gibi yağlayıcıları içeren sürtünme düzenleyicilerden [16]; mukavemetini, aşınma direncini ve ısı dağıtımını artıran metalik lifler (çelik, bakır) [17], seramik lifler (aramid, karbon) [18] ve organik lifler gibi takviye liflerinden [19]; son olarak da maliyeti düşürmek, yoğunluğu ayarlamak ve işlenebilirliği artırmak için kullanılan baryum sülfat ve kok kömürü gibi dolgu maddelerinden oluşur [20,21]. Bu bileşenlerin doğru oranlarda bir araya getirilmesi, fren balatasının performansını, ömrünü ve güvenilirliğini doğrudan etkiler.



Şekil 1. Fren balatası bileşenleri

2.1. Bağlayıcılar

Fren balatalarında bağlayıcı olarak kullanılan termoset fenolik reçineler, yüksek sıcaklıklarda rijit yapılarını koruyup karbonlu kalıntı bırakarak mekanik dayanımı sürdürdükleri için yaygın şekilde tercih edilir. Ancak 300–350 °C'nin üzerinde bozulmaları ve üretimlerinde toksik formaldehit içermeleri, çevresel ve sağlık açısından önemli sınırlamalar yaratmaktadır [22]. Bu doğrultuda, fenolik reçinelerin çevresel sınırlamaları, araştırmacıları hem bu yapıları modifiye etmeye hem de epoksi, kauçuk, melamin gibi alternatif bağlayıcılara yönlendirmiştir. Özellikle lignin, tanen ve furfural alkol gibi yenilenebilir kaynaklara dayalı biyobazlı reçineler, formaldehit içermemeleri ve sürdürülebilir özellikleriyle çevre dostu bağlayıcı sistemler geliştirilmesinde umut vadeden alternatifler olarak öne çıkmaktadır [23]. Bu çerçevede, özellikle tanen bazlı reçineler, yüksek sıcaklık altında kimyasal kararlılıkları sayesinde hem performans hem de çevresel açıdan avantajlı bir alternatif olarak öne çıkmaktadır. Bağlayıcıların cam geçiş sıcaklığı (T_g), termal bozunma sıcaklığı (T_{max}) ve karbon kalıntısı oranı gibi termal özellikleri ise, fren balatalarının aşınma direnci, yüksek sıcaklık stabilitesi ve uzun servis ömrü üzerinde doğrudan etkili olup, malzeme seçiminde kritik belirleyicilerdendir [24].

2.2. Sürtünme Düzenleyiciler

Fren balatalarında kullanılan sürtünme düzenleyici malzemeler, fren performansını optimize etmek amacıyla sürtünme katsayısını stabilize ederken aşınma direncini artırmakta ve termal kararlılığı iyileştirmektedir [25,26]. Bu amaçla kullanılan grafit ve antimon trisülfür gibi malzemeler, yüksek sıcaklık altında sürtünme stabilitesini koruyarak etkili bir frenleme sağlamaktadır [25]. Öte yandan, zirkonyum silikat gibi aşındırıcı düzenleyiciler, sürtünme katsayısını artırmakta fakat aşırı kullanımı aşınmayı hızlandırabilmektedir [26]. Ayrıca, düzenleyici malzemelerin tane boyutu, morfolojisi ve matrisle olan etkileşim düzeyi gibi parametreler, kompozit sistemin genel tribolojik performansı üzerinde belirleyici rol oynamakta; bu nedenle, uygun malzeme seçiminin yanı sıra doğru proses parametrelerinin belirlenmesi de fren balatası üretiminde kritik bir faktör olarak öne çıkmaktadır [27]. Bu bağlamda, düzenleyici katkıların miktarı ve dağılımı, frenleme sırasında oluşan ısı birikimini ve yüzeyde meydana gelen mikroyapısal değişimleri doğrudan etkileyerek, balatanın hizmet ömrü ve güvenliği üzerinde önemli sonuçlar doğurabilmektedir [28].

2.3. Dolgu Maddeleri

Fren balatalarında kullanılan dolgu malzemeleri, kompozit yapının mekanik, termal ve tribolojik özelliklerini optimize etmek amacıyla önemli bir rol oynamaktadır. Bu malzemeler, genellikle organik ve inorganik olarak sınıflandırılır ve her biri fren performansını farklı şekillerde etkiler. Organik dolgular arasında bulunan Kaju tozu, fren balatalarında bağlayıcı ve ısı emici özellikleri sayesinde sürtünme stabilitesini artırırken, gürültü ve titreşimi azaltarak termal dengeye katkı sağlar [29]. İnorganik dolgular ise barit (baryum sülfat), mika, vermikülit ve kalsiyum karbonat gibi mineralleri içerir [30]. Ayrıca, tarım atıkları gibi doğal malzemeler de dolgu olarak kullanılmakta ve çevresel sürdürülebilirliğe katkı sağlamaktadır [31].

2.4. Yağlayıcı Malzemeler

Fren balatalarında kullanılan yağlayıcı malzemeler, sürtünme katsayısının kontrolü, aşınma direncinin artırılması ve frenleme sırasında oluşan gürültü ile titreşimin azaltılması gibi önemli işlevler üstlenir. Grafit, bu alanda en yaygın tercih edilen katı yağlayıcılardan biridir [32]. Antimon trisülfür (Sb_2S_3) ve molibden disülfür (MoS_2) gibi metal sülfürler de yüksek sıcaklıklarda sürtünme stabilitesi sağlamak amacıyla kullanılır. Yağlayıcı partikül boyutu da performansı etkileyen kritik bir faktördür; örneğin, mikro ve nano boyuttaki grafitlerin kullanımı, fren balatalarının aşınma direnci ve sürtünme davranışı üzerinde belirgin farklılıklar göstermektedir [33].

2.5. Takviye Edici Malzemeler

Fren balatalarında kullanılan takviye malzemeleri, kompozitlerin mekanik dayanıklılığı ve sürtünme performansını geliştirmek amacıyla çeşitli türlerde tercih edilmektedir. Sentetik lifler arasında karbon ve aramid (Kevlar) gibi materyaller öne çıkar; bunlar yüksek mukavemet ve ısıya dayanıklılık sağlayarak fren balatalarının uzun ömürlü olmasına katkıda bulunur. Örneğin, karbon fiber takviyeli kompozitlerin eğilme ve çekme dayanımları belirgin şekilde artmaktadır [34].

Son yıllarda çevre ve insan sağlığına yönelik endişeler nedeniyle doğal lifler de alternatif takviye malzemesi olarak önem kazanmıştır. Muz kabuğu, hurma posası gibi bitkisel lifler hem biyobozunur özellikleri hem de düşük yoğunlukları sayesinde geleneksel takviyelere karşı cazip seçenekler olarak öne çıkmaktadır. Bu doğal liflerin kullanımı, fren balatalarının yoğunluğu, sertliği, sürtünme katsayısı ve aşınma performansı gibi özellikleri olumlu yönde etkilemektedir [35].

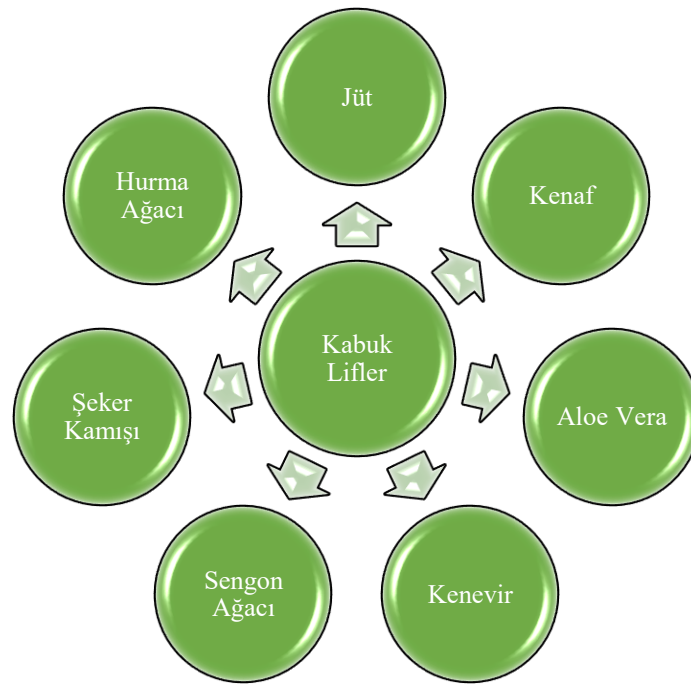
Bu çeşitli takviye malzemeleri, fren balatalarının performans kriterlerine göre optimize edilmesini mümkün kılarak hem teknik gereksinimleri karşılamaya hem de çevresel duyarlılığı artırmaya olanak tanır.

3. Takviye Edici Malzemelerde Bitkisel Doğal Liflerin Genel Sınıflandırılması

Fren balatası uygulamalarında doğal liflerin kullanımı, çevresel sürdürülebilirlik ve maliyet etkinliği açısından giderek daha fazla ilgi görmektedir. Sunulan çalışmalar, kabuk, yaprak, meyve, sap ve tohum gibi çeşitli doğal liflerin fren balatası üretiminde potansiyelini incelemektedir. Bu lifler, geleneksel asbest ve sentetik malzemelere çevre dostu ve güvenli alternatifler sunmaktadır [35,36].

3.1. Kabuk Liflerinin Tanımı ve Fren Balatası Uygulamalarında Kullanımı

Bitkisel kabuk lifleri, bitkilerin gövde veya saplarının kabuk tabakalarında bulunan selülozik yapılardır. Bitkinin kendi yapısal bütünlüğünü destekleyen bu doğal lifler, dış katmanlarından ayrıştırılarak elde edilirler. Genellikle sağlam, dayanıklı ve esnekler, bu da onları çeşitli kullanım alanları için ideal kılar [37]. Kabuk lifleri ile ilgili fren balatalarında kullanılan lifler Şekil 2’de verilmiştir.



Şekil 2. Bitkisel Kabuk Lifleri

3.1.1. Jüt, Kenaf ve Aloe Vera Lifleri: Sri Karthikeyan ve arkadaşlarının çalışması, epoksi reçine ve sertleştirici katkısıyla üretilen kompozit fren balatalarının sonlu elemanlar yöntemi (FEA) kullanılarak gerçekleştirilen mekanik analizlerini sunmaktadır. Karşılaştırmalı analizler sonucunda, jüt lifli takviyeli fren balataları, en düşük deformasyon ve gerilme değerlerini sergileyerek mekanik açıdan üstün performans göstermiştir. Bu bulgular, jüt liflerinin otomotiv fren sistemlerinde sürdürülebilir ve güvenli bir alternatif malzeme olarak potansiyelini vurgulamaktadır [38].

3.1.2. Kenevir, Rami ve Ananas Lifleri: Singh yaptığı çalışmada, otomotiv fren sistemlerinde kullanılmak üzere doğal liflerle (kenevir, rami, ananas) güçlendirilmiş kompozit malzemelerin en uygun tasarımını belirlemek amacıyla CRITIC-MEW optimizasyon yöntemini kullanmıştır. Çalışmada, farklı oranlarda doğal lif içeren kompozitlerin sürtünme özellikleri detaylı bir şekilde test edilmiştir. Test sonuçları, özellikle %5 oranında rami lifi içeren kompozit malzemenin, belirlenen performans kriterlerini en iyi şekilde karşıladığını ortaya koymuştur. Bu bulgular, rami liflerinin otomotiv fren uygulamaları için umut vadeden bir doğal takviye malzemesi olduğunu göstermektedir [39].

3.1.3. Kenevir Lifleri: Naidu ve arkadaşlarının çalışması, doğal kenevir lifleri kullanılarak geliştirilen fren balatası malzemelerinin aşınma ve sürtünme özelliklerini kapsamlı bir şekilde analiz etmiştir. Kenevir gibi doğal liflerin hafiflik, biyolojik olarak parçalanabilirlik ve düşük maliyet gibi avantajları, özellikle egzoz dışı fren tozu kaynaklı çevresel

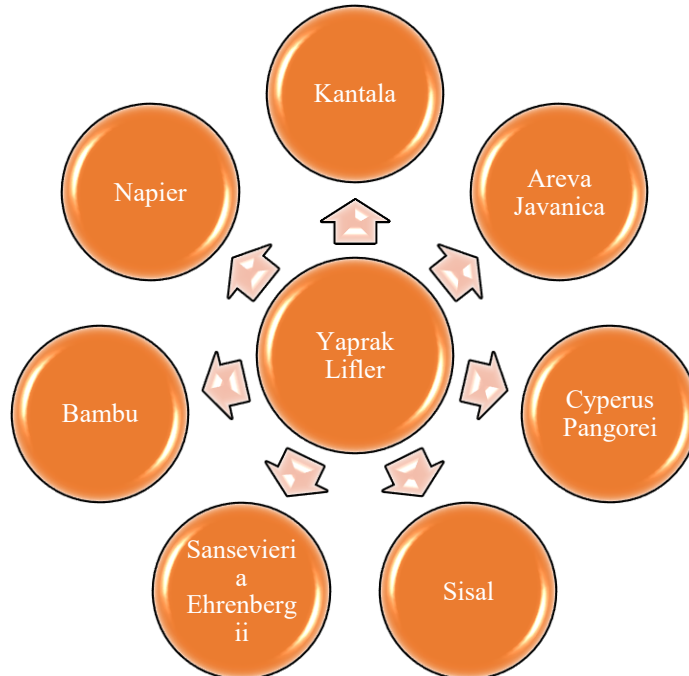
kirliliğin azaltılması potansiyeli açısından değerlendirilmiştir. Çalışma sonuçları, doğal kenevir liflerinin fren balatası malzemeleri için umut vadeden bir alternatif olabileceğini desteklemektedir. Özellikle, %6 NaOH ile işlenmiş kenevir lifleri içeren HF6P20 bileşiminin, diğer denenen kompozisyonlara kıyasla üstün aşınma ve sürtünme performansı sergilediği tespit edilmiştir. Bu bulgular, sürdürülebilir fren teknolojileri geliştirme çabalarına önemli katkılar sunmaktadır [40].

3.1.4 Albizia Chinensis (Sengon Ağacı) Odun Lifleri: Azamataufiq Budiprasojo ve Bayu Rudyanto'nun çalışması, fren balatalarında Albizia chinensis (sengon ağacı) odunundan elde edilen organik malzemelerin kullanımını araştırmıştır. Genel olarak, incelenen organik fren balatası varyasyonlarının, orijinal ekipman üreticisinin (OEM) standartlarına kıyasla henüz üstün olmadığı belirtilmiştir. Araştırma bulguları, organik ahşap içeriğinin azalmasının sürtünme katsayısını ve fren balatası aşınma oranını artırabileceğini göstermiştir. Ayrıca, kompozisyona alüminyum eklenmesinin aşınma oranını artırdığı, ancak sıcaklık direncini ve sürtünme katsayısını önemli ölçüde iyileştirmediği tespit edilmiştir. Bu sonuçlar, sengon ağacı odunundan elde edilen organik malzemelerin fren balatası uygulamaları için optimize edilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır [41].

3.1.5 Şeker Kamışı Odunu ve Hurma Çekirdeği Lifi: Obika ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilen çalışma, şeker kamışı odunu ve hurma çekirdeği lifi kombinasyonunun, yüksek basınç dayanımı ve yoğunluğa sahip bir otomobil fren balatası üretiminde potansiyel sunduğunu ortaya koymuştur. Çalışma bulguları, şeker kamışı içeriğinin hurma çekirdeği lifine kıyasla daha yüksek olmasının, fren balatasının basınç dayanımı üzerinde daha olumlu bir etki yarattığını göstermektedir. Bu durum, şeker kamışının kompozit fren balatası uygulamalarında önemli bir rol oynayabileceğini düşündürmektedir [42].

3.2. Yaprak Liflerinin Tanımı ve Fren Balatası Uygulamalarında Kullanımı

Yaprak lifleri, bitkilerin yapraklarından elde edilen doğal liflerdir. Bu lifler genellikle uzun, güçlü ve dayanıklı olmalarıyla bilinirler. Bitkinin yapısına ve türüne bağlı olarak farklı özelliklere sahip olabilirler. Yaprak lifleri, bitkinin destekleyici dokularında bulunur ve bitkinin dik durmasını ve dış etkenlere karşı direncini sağlamaya yardımcı olur [43]. Yaprak lifleri ile ilgili kullanılan lifler Şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 3. Bitkisel Yaprak Lifler

3.2.1. Cantala (Kantala) Lifleri ve Karbon Nanotüpler (MWCNT): Bellairu ve arkadaşlarının çalışması, çevre dostu ve düşük maliyetli doğal lif takviyeli polimer nanokompozitlerin geliştirilmesini hedeflemiştir. Bu amaçla, cantala lifleri, çok duvarlı karbon nanotüpler (MWCNT) ve epoksi reçine kullanılarak çeşitli kompozisyonlar üretilmiştir.

Gerçekleştirilen üç nokta eğilme testi sonuçları, karışım tasarımı modeliyle optimize edilen bu nanokompozitlerin, çevreye duyarlı mühendislik uygulamaları için önemli bir potansiyele sahip olduğunu ortaya koymuştur. Bu bulgular, sürdürülebilir malzeme bilimi alanındaki gelişmelere katkı sağlamaktadır [44].

3.2.2 Areva Javanica (AJ) Lifi: Ahmed ve arkadaşlarının çalışması, Amaranthaceae familyasından Areva javanica (AJ) lifinin sürtünme kompozitlerindeki potansiyel kullanımını araştırmıştır. Bu kapsamda, AJF'nin kimyasal, termal ve morfolojik özellikleri detaylı olarak incelenmiş ve disk fren balatalarında akrilik liflere alternatif olabileceği değerlendirilmiştir. Yapılan testler, AJF'nin fren balatası uygulamalarında kullanılabileceğini göstermekle birlikte, akrilik liflere kıyasla biraz daha yüksek aşınma sergilediğini ortaya koymuştur. Bu bulgular, doğal liflerin sürtünme malzemeleri alanındaki yerini daha iyi anlamamıza yardımcı olmaktadır [45].

3.2.3. Cyperus Pangorei (CP) Lifleri: Ganesh Babu tarafından yapılan çalışma, fren balatası uygulamalarında kullanım potansiyeli taşıyan Cyperus pangorei (CP) liflerinin incelenmesine odaklanmıştır. Çalışmada, CP lifleri manuel retting işlemiyle elde edilmiş ve yapışma özelliklerini geliştirmek amacıyla benzoil klorür ile kimyasal işleme tabi tutulmuştur. Gerçekleştirilen testler sonucunda, benzoil klorür ile işlenmiş CP liflerinden üretilen fren balatalarının, işlem görmemiş liflere kıyasla daha üstün performans sergilediği tespit edilmiştir. Bu durum, kimyasal işlemin lifler ile matris arasındaki arayüzey bağlanmasını önemli ölçüde iyileştirmesiyle açıklanmıştır. Bu bulgular, doğal liflerin fren balatası kompozitlerindeki performansının kimyasal modifikasyonlarla artırılabilirliğini göstermektedir [46].

3.2.4. Sisal, Jüt Lifleri ve Hibrit Kompozitler: Manjulaiah ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilen çalışma, yeni, hafif ve asbest içermeyen kompozit fren balatalarının geliştirilmesini hedeflemiştir. Bu amaçla, doğal lifler (sisal, jüt ve bunların karışımları), epoksi polimer, dolgu maddeleri ve sürtünme katkı maddeleri kullanılarak çeşitli kompozisyonlar üretilmiştir. Yapılan testler, sisal-jüt lifi epoksi dolgulu hibrit kompozitlerin, asbestin yerine kullanılabilecek hafif ve çevre dostu fren balataları üretiminde önemli bir potansiyel alternatif olabileceğini göstermektedir. Bu bulgular, sürdürülebilir malzeme bilimi ve otomotiv endüstrisi için umut vadeden sonuçlar sunmaktadır [47].

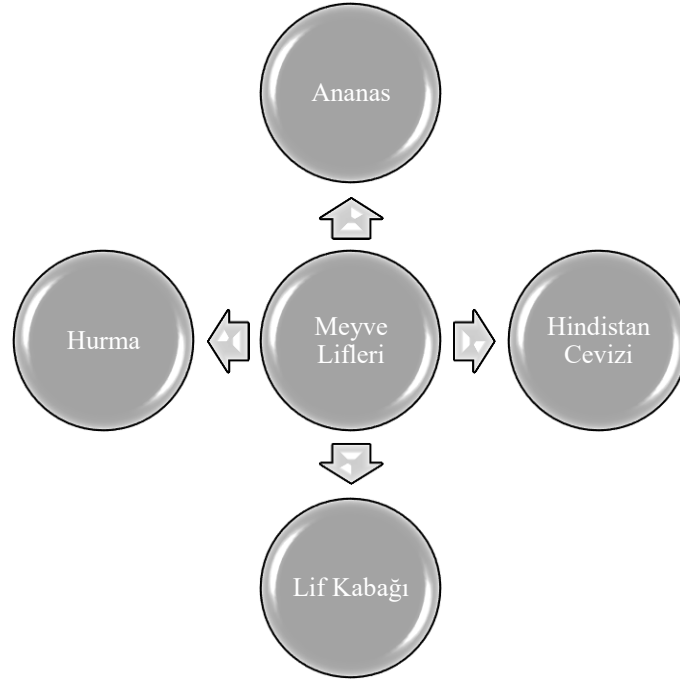
3.2.5. Sansevieria Ehrenbergii (SEF) Lifleri: Senthil Kumaran ve arkadaşlarının çalışması, ham ve kimyasal olarak işlem görmüş Sansevieria ehrenbergii (SEF) liflerinin fren balatası uygulamalarında kullanım potansiyelini araştırmıştır. Çalışmanın sonuçları, kimyasal işlem görmüş SEF'lerin fren balatası uygulamalarının fiziksel, kimyasal ve termal özelliklerini iyileştirmek için daha elverişli olduğunu ortaya koymuştur. Bu bulgular, SEF'lerin kompozit malzemelerde sentetik liflerin yerine geçebilecek uygun bir doğal lif olarak değerlendirilebileceğini düşündürmektedir [48].

3.2.6. Bambu ve PAN (Poliakrilonitril) Lifleri: Kumar ve arkadaşlarının çalışması, fren balatası uygulamalarında aramid lifi yerine bambu ve poliakrilonitril (PAN) gibi doğal liflerin kullanım potansiyelini incelemiştir. Yapılan araştırmalar sonucunda, %3 bambu/PAN lifi içeren kompozitlerin (BF-1), stabilite ve değişkenlik açısından iyi performans sergilediği tespit edilmiştir. Bu çalışma, bambu ve PAN liflerinin, fren balatalarında asbest ve aramid gibi zararlı veya pahalı malzemelerin yerine kullanılabileceğini ortaya koymaktadır. Bu bulgular, daha sürdürülebilir ve maliyet etkin fren balatası çözümlerinin geliştirilmesi için önemli bir adım teşkil etmektedir [49].

3.2.7. Napier Lifi: Kumar ve arkadaşlarının çalışması, %5 ila %20 arasında değişen oranlarda Napier lifi içeren kompozit malzemelerin üretimi ve performans testlerine odaklanmıştır. Elde edilen sonuçlar, Napier lifi katkılı kompozitlerin, belirli oranlarda kullanıldığında, tatmin edici mekanik özellikler sergilediğini ve asbest içermeyen fren balataları için umut verici bir alternatif olabileceğini göstermiştir. Detaylı analizlerde, %5 Napier lifi içeren kompozitlerin daha iyi sürtünme performansı gösterdiği, buna karşılık %20 lif içeren kompozitlerin ise daha yüksek ısı kararlılığına sahip olduğu belirlenmiştir. Bu bulgular, Napier liflerinin farklı oranlarda kullanımının, fren balatası uygulamalarında hem sürtünme hem de termal özellikler açısından optimize edilebileceğine işaret etmektedir [50].

3.3. Meyve Liflerinin Tanımı ve Fren Balatası Uygulamalarında Kullanımı

Meyve lifleri, bitkilerin meyvelerinden elde edilen doğal liflerdir. Bu lifler genellikle meyvenin kabuk, etli kısım veya çekirdek gibi farklı bölümlerinden çıkarılır. Yapıları ve özellikleri, elde edildikleri meyve türüne göre değişiklik gösterebilir. Meyve lifleri de diğer bitkisel lifler gibi temel olarak selülozdan oluşur. Genellikle sağlam, dayanıklı ve esnek liflerdir [51]. Meyve lifleri ile ilgili kullanılan lifler Şekil 4'te verilmiştir.



Şekil 4. Bitkisel Meyve Lifleri

3.3.1. Ananas Lifi: Bozaci'nın çalışmasında vurgulandığı üzere, yüksek selüloz içeriği, düşük maliyeti ve biyolojik olarak parçalanabilirliği nedeniyle doğal liflerin kompozitlerde kullanımına olan ilgi artmaktadır. Bu bağlamda, ananas lifi takviyeli polimerik kompozitler, yüksek spesifik mukavemet ve modülleri sayesinde öne çıkmaktadır. Her ne kadar sentetik lifler kadar mukavemetli olmasalar da ananas lifinin düşük maliyeti ve biyolojik olarak parçalanabilirliği, onu önemli bir alternatif haline getirmektedir. Ayrıca, ananasın yıllık olarak hasat edilebilme özelliği, bu lifi tükenmez bir kaynak olarak konumlandırmakta ve sürdürülebilir malzeme geliştirme çabalarına önemli katkılar sunmaktadır [52].

3.3.2. Hindistancevizi Lifi: Fren balatalarında kullanım potansiyeli çeşitli çalışmalarda incelenmiştir.

Ali ve arkadaşlarının çalışması, hindistan cevizi lifi takviyeli kompozitlerin mekanik özelliklerini incelerken (%2 lif içeren kompozitlerin çekme modülü, basınç dayanımı, darbe enerjisi ve eğilme dayanımında, %6 lif içeren kompozitlerin ise çekme, kesme ve kavitasyon dayanımlarında üstün performans sergilemesi), aynı zamanda artan lif içeriğiyle ısı kararlılığının arttığını ve aşınma testlerinin, bu lifin fren balatalarında asbest ve Kevlar yerine çevre dostu bir alternatif olabileceğini ortaya koymuştur [53].

Ashok Kumar ve arkadaşlarının çalışması, toz metalurjisi yöntemiyle üretilen %5 ve %10 hindistancevizi lifi içeren alüminyum kompozitlerin asbestsiz fren balatası malzemesi olarak tribolojik özelliklerini pin-on-disk testleriyle incelemiştir; bu testler, hindistancevizi lifinin fren balatalarında potansiyel bir alternatif malzeme olduğunu ve aşınma davranışının tribolojik parametreler ile karakterize edilebileceğini ortaya koymuştur [54,55].

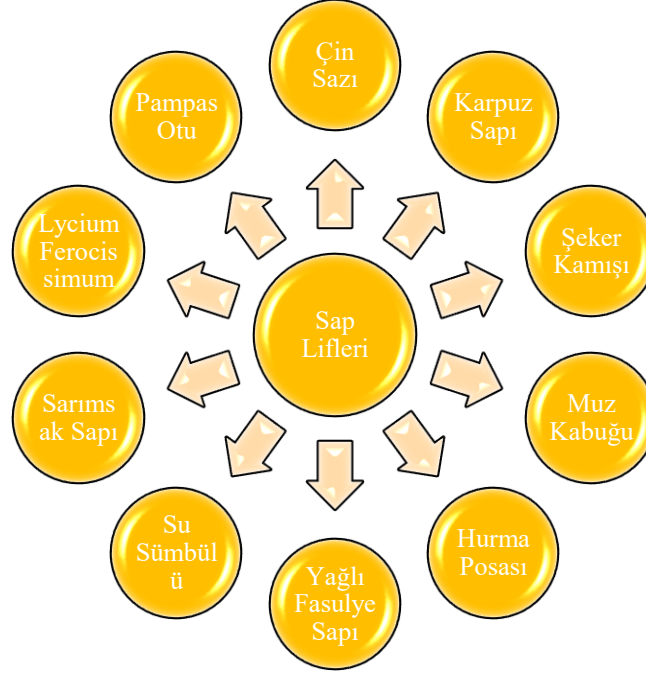
Maleque ve arkadaşlarının bir başka çalışması, %5 hacim kesri hindistancevizi lifi takviyeli kompozitlerin, daha yüksek yoğunluk, daha düşük porozite, daha yüksek basma mukavemeti ve daha düşük aşınma ağırlık kaybı sergilediğini göstermiştir. Yapılan mikroyapı analizi, hindistancevizi lifinin matris içinde homojen bir şekilde dağıldığını teyit ederken, bu bulgular, doğal hindistancevizi lifinin, zararlı etkisi olmayan asbestsiz yeni fren balatalarının büyük ölçekli üretimi için potansiyel bir dolgu malzemesi olabileceğini desteklemektedir [56].

3.3.3. Luffa Cylindrica (Lif Kabağı) Lifi: Sekar çalışmasında, geleneksel olarak Güney Hindistan'da hafif bileşenler yapmak için kullanılan Luffa cylindrica gibi doğal liflerin, epoksi kompozit ile birleştirildiğinde çelik fren balatalarına kıyasla kayda değer mekanik özellikler sergilediğini ortaya koymuştur. Bu kompozitlerin, yüksek özgül dayanım ve sertlik, uzun yorulma ömrü, düşük yoğunluk ve düşük termal iletkenlik gibi avantajlara sahip olduğu belirtilmiştir [57].

3.3.4. Hurma Lifi: Mobi ve arkadaşlarının çalışması, hurma lifi (PFF) kullanılarak üretilen otomobil fren balatalarının mekanik özelliklerinin optimizasyonunu araştırmaktadır. Doğal liflerin ve tarımsal atıkların fren balatası üretiminde giderek artan kullanımına paralel olarak, bu araştırma hurma lifinin otomobil fren balatası geliştirmeyi hedefleyen endüstriler ve yerel üreticiler için önemli bir rehber niteliğindedir [58].

3.4. Sap Liflerinin Tanımı ve Fren Balatası Uygulamalarında Kullanımı

Sap lifleri, bitkilerin sap veya gövde kısmından elde edilen doğal liflerdir. Bu lifler, bitkinin dış kabuğu (floem) veya odunsu kısmında (ksilem) bulunur ve bitkiye destek sağlama, su ve besin taşıma gibi önemli işlevleri yerine getirirler. Yapısal olarak genellikle uzun, güçlü ve esnek liflerdir [59]. Sap lifleri ile ilgili kullanılan bitkisel lifler Şekil 5'te verilmiştir.



Şekil 5. Bitkisel Sap Lifleri

3.4.1. Miscanthus (Çın Sazı): Kchaou ve arkadaşlarının çalışması, Miscanthus lifinin fren malzemelerindeki kullanım potansiyelini araştırmıştır. Geliştirilen ve fiziksel, mekanik ve mikroyapısal olarak test edilen üç Miscanthus lifi içeren malzeme (Mat1, Mat2, Mat3) üzerinde yapılan performans analizleri, Miscanthus'un iyi sürtünme kaybı direnci, aşınma direnci ve geri kazanım özellikleri ile faydalı olduğunu göstermiştir. Özellikle Mat1 (%5 Miscanthus lifi), daha az sürtünme kaybı, yüksek geri kazanım ve daha az aşınma oranı sergilemiştir. Genel olarak, Miscanthus lifi, ticari formülasyonlarla karşılaştırılabilir özellikler sunarak, fren sürtünme malzemelerinin geliştirilmesinde başarılı bir doğal içerik olduğunu kanıtlamıştır [60].

3.4.2. Citrullus Lanatus (Karpuz Sapı) Lifleri: Paramathma ve arkadaşlarının çalışması, çevre dostu otomotiv fren balatası üretiminde geleneksel cam elyafı yerine karpuz sapından (Citrullus lanatus) elde edilen liflerin kullanılabilirliğini incelemiştir. Liflerin silan ile kimyasal olarak işlenmiş (treated) ve işlenmemiş (untreated) halleri karşılaştırılmıştır. Silan ile işlenmiş liflerin, daha yüksek selüloz içeriği (%60,3) sayesinde daha iyi termal ve mekanik dayanım sağladığı tespit edilmiştir. Lignin ve hemiselüloz gibi amorf yapıdaki maddelerin azalması ise ısı ve nem direncini artırmıştır. Sonuç olarak, silanla işlenmiş Citrullus lanatus lifleri, iyileşmiş lif-matris bağlanması, azalan aşınma ve endüstri standartlarını karşılayan fren performansı nedeniyle fren balatalarında cam elyafa çevre dostu bir alternatif olarak başarıyla kullanılabilir niteliktedir [61].

3.4.3. Şeker Kamışı Lifi (SCF): Mehta ve arkadaşlarının çalışması, fren balatalarında kullanılan Kevlar ve asbest gibi geleneksel malzemelere çevre dostu bir alternatif olarak kimyasal işlem görmüş şeker kamışı lifinin (SCF) kullanımını araştırmıştır. Çalışma, SCF bazlı fren balatası numunelerinin fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklerde mükemmel performans gösterdiğini ve Kevlar kompozitlerine çok yakın değerler sergilediğini belirtmiştir. Ayrıca, tüm SCF bileşiklerinde SCF-1 bileşiklerinin iyileştirilmiş termal, tribolojik ve mekanik sonuçlar sergilediği görülmüştür [62].

3.4.4. Muz Kabuğu ve Muz Ağacı Kabuğu Tozu: B. Sugözü ve İ. Sugözü'nün çalışması, atık muz kabuğu ve muz ağacı kabuğunun otomotiv fren balatalarında yeni bir bağlayıcı malzeme olarak kullanılabilirliğini deneysel olarak araştırmıştır. Bu kapsamda, fenolik reçine miktarı azaltılarak %10 muz kabuğu ve %10 muz ağacı kabuğu tozları eklenerek üç farklı fren balatası numunesi üretilmiştir. Üretilen balataların fren performansı, sürtünme, aşınma, yoğunluk ve sertlik testleri

ile detaylı bir şekilde incelenmiştir. Genel olarak, yapılan testler sonucunda muz atıklarının fren balatalarında kullanılabilecek potansiyel alternatif malzemeler olduğu gözlemlenmiştir [63].

3.4.5. Hurma Posası ve Diğer Bitkisel Lifler: Ammar ve arkadaşlarının çalışması, doğal liflerin alternatif takviye malzemesi olarak artan önemini vurgulayarak, özellikle muz kabuğu ve hurma posası gibi bitkisel liflerin hem biyobozunur özellikleri hem de düşük yoğunlukları sayesinde geleneksel takviyelere karşı cazip seçenekler olarak öne çıktığını belirtmektedir. Bu doğal liflerin kullanımı, fren balatalarının yoğunluğu, sertliği, sürtünme katsayısı ve aşınma performansı gibi özelliklerini olumlu yönde etkilemektedir [64].

3.4.6. Yağlı Fasulye Sapı: Dirisu ve arkadaşlarının çalışması, hindistan cevizi kabuğu ve yağlı fasulye sapı gibi doğal liflerin fren balatası geliştirme için etkili dolgu maddeleri olarak kullanılabileceğini araştırmıştır. Özellikle, yağlı fasulye sapı için elde edilen sonuçların, ticari fren balataları ile olumlu bir şekilde karşılaştırılabilir nitelikte olduğu vurgulanmıştır [65].

3.4.7. Su Sümbülü Lifleri: Palai ve arkadaşlarının çalışması, silan ile işlenmiş su sümbülü liflerinin otomotiv fren balatası uygulamalarında güçlendirme malzemesi olarak kullanılabileceği sonucuna varmıştır [66].

3.4.8. Allium Sativum (Sarımsak Sapı) Lifli: Kumar ve arkadaşlarının çalışması, silan işlemine tabi tutulmuş Allium sativum (sarımsak sapı) lifinin biyokütle esaslı fren balatalarının tribolojik davranışı üzerindeki etkisini incelemiştir. Sentetik baritler ile dengelenerek, ağırlıkça %0'dan %10'a kadar değişen oranlarda işlem görmemiş ve silan işlemine tabi tutulmuş liflerden beş farklı kompozisyon oluşturulmuştur. Krauss makinesinde ECE R90 test standardına göre yapılan fren performans analizinde, Allium sativum lifinin doğal olarak sürtünme dalgalanmalarını azalttığı bulunmuştur. Özellikle, %5 ağırlıkça silan işlemine tabi tutulmuş lif içeren BP4 kompoziti, %12,37'lik bir solma oranı, %110,40'lık bir geri kazanım oranı göstermiş ve daha az aşınma kaybı ile kompozitler arasında en iyi performansı sergilemiştir. Bu araştırma, biyokütlenin yapışkanlığının bileşenleri iyi tuttuğunu ve silan işleminin birincil plato bölgelerinde karbon yüzdesinde artış sağlayarak sürtünme katsayısının dengelenmesinden sorumlu olduğunu ortaya koymuştur [67].

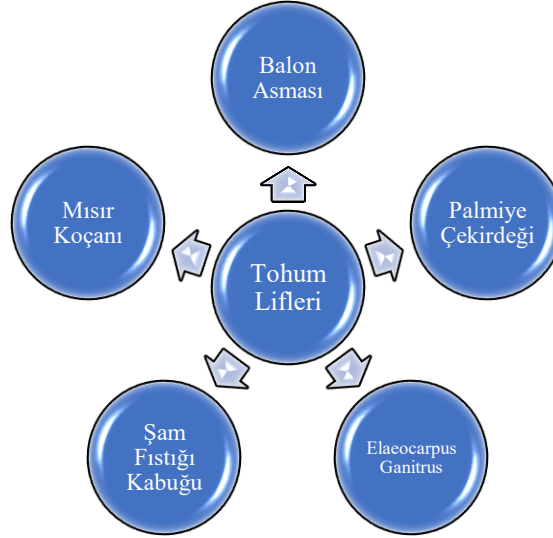
3.4.9. Lycium Ferocissimum Sapı Lifleri: Ganesh ve arkadaşlarının çalışması, otomotiv sektöründe artan çevre bilinci ve atıktan zenginliğe dönüşüm kavramları doğrultusunda, fren uygulamaları için doğal takviyeli sürtünme kompozitlerinde Lycium ferocissimum sapı liflerinin kullanımını incelemiştir. Manuel olarak ısıtılıp ekstrakte edilen ve ardından benzoil klorür ile işleme tabi tutulan bu lifler hem işlenmiş hem de işlenmemiş formda sürtünme kompoziti formülasyonlarında kullanılmış ve sonuçlar piyasada bulunan ticari sürtünme kompozitleriyle karşılaştırılmıştır. Test sonuçları, benzoil klorür ile işlenmiş Lycium ferocissimum lifleri esaslı sürtünme kompozitlerinin, %5,4'lük bir ağırlık kaybıyla diğerlerine kıyasla daha iyi aşınma direnci ve iyi sürtünme özellikleri sergilediğini göstermiştir [68].

3.4.10. Cortaderia Selloana (Pampas Otu) Biyokütlesi: Yavuz ve arkadaşlarının çalışması, aspir bazlı biyokütleden geliştirilen taşıt fren balatalarının performansını incelemiştir. Bu kapsamda, Cortaderia Selloana (pampas otu) adı verilen doğal bir türden elde edilen, düşük metalik ve asbest içermeyen fren balatası numuneleri geliştirilmiştir. Çalışma, Cortaderia Selloana'nın fren balatalarında doğal ve sürdürülebilir bir malzeme olarak kullanılabileceğini ve bu balataların frenleme performanslarının istenen düzeyde olduğunu belirlemiştir. Bu bulgular, çevre dostu fren teknolojileri alanında önemli bir potansiyel sunmaktadır [69].

3.5. Tohum Liflerinin Tanımı ve Fren Balatası Uygulamalarında Kullanımı

Tohum lifleri, bitkilerin tohumlarından veya tohum kabuklarından elde edilen doğal liflerdir. Bu lifler, bitki tohumunu koruma ve dağılmasına yardımcı olma işlevini üstlenirler. Genellikle yumuşak, hafif ve çok yönlü olmalarıyla bilinirler. Kimyasal bileşimleri büyük ölçüde selülozdan oluşur ve diğer bitkisel liflere göre daha az miktarda lignin içerirler [70]. Tohum lifleri ile ilgili kullanılan bitkisel lifler Şekil 6'da verilmiştir.

3.5.1. Cardiospermum Halicacabum (Balon Asması) Tohum Biyolifi: Raghunathan ve arkadaşlarının çalışması, otomobil fren balatalarında yüzey işlemine tabi tutulmuş/işlem görmemiş Cardiospermum halicacabum tarımsal atık biyolifinin etkin kullanımı ve tribolojik performansını incelemiştir. Lifler, standart manuel retting tekniği ile çıkarılmış ve ardından alkali ve silan işlemlerine tabi tutulmuştur. Fizyokimyasal özellikleri test edilen bu liflerle standart bir endüstriyel üretim prosedürü kullanılarak fren balatası kompozitleri üretilmiştir. Yapılan analizlerde, silanla işlenmiş Cardiospermum halicacabum liflerinden yapılan fren balatalarının, alkaliyle işlenmiş ve işlem görmemiş liflerden yapılanlara kıyasla daha yüksek bir sürtünme katsayısı sergilediği tespit edilmiştir. Test edilen balataların aşınmış yüzeyleri taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenerek plato oluşumları ve pulluk izleri gibi belirgin özellikler ortaya çıkarılmıştır. Son olarak, balatalar Kapsamlı Değerlendirme Yöntemi kullanılarak farklı kriterler dikkate alınarak sıralanmıştır [71].



Şekil 6. Bitkisel Tohum Lifleri

3.5.2. Palmiye Çekirdeği Lifleri (PKF): Sai Krishnan ve arkadaşları, fren balatalarında sentetik liflerin yerine palmiye çekirdeği liflerinin kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Bu kapsamda, farklı ağırlık yüzdelerinde (%0, %5 ve %10) palmiye çekirdeği lifi içeren standart fren balatası formları geliştirilmiştir. Üretilen balataların fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri incelenmiş, tribolojik özellikleri ise "Chase Test Rig" kullanılarak test edilmiştir. Sonuçlar, palmiye çekirdeği lifi içeriği arttıkça sürtünme katsayısının azaldığını göstermiştir. Özellikle %5 ağırlıkta palmiye çekirdeği lifi içeren balatalar, daha yüksek sürtünme değeri (0.454) ve daha düşük "fade" yüzdesi sergilerken, %10 lif içeren balatalarda bazı dalgalanmalar gözlemlenmiştir. Çalışma, %5 ağırlığındaki palmiye çekirdeği lifinin, fren balatalarında sentetik liflerin yerine kullanılabileceğini ortaya koymuştur [72].

3.5.3. Elaeocarpus Ganitrus Tohumu Tozu: Afiefudin ve arkadaşları, Elaeocarpus ganitrus tohumu tozunun, artan yoğunluk ve sertlik gibi iyileştirilmiş özellikler sayesinde fren balatası üretiminde asbeste uygun bir alternatif malzeme olabileceği sonucuna varmışlardır [73].

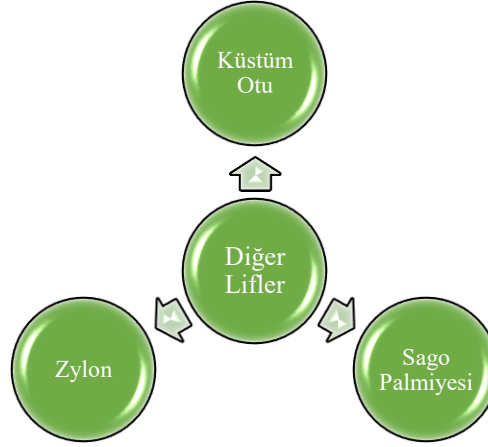
3.5.4. Mısır Koçanı Kabukları: Ademoh ve arkadaşlarının çalışması, fren balatası üretiminde kullanılabilecek potansiyel bir doğal malzemeyi incelemiştir. Araştırma, bu malzemenin fren performansı üzerindeki etkilerini ve genel uygunluğunu değerlendirerek, çevre dostu ve sürdürülebilir fren çözümleri arayışına katkıda bulunmayı hedeflemektedir [74].

3.5.5. Şam Fıstığı Kabuğu ve Hindistan Cevizi Kabuğu: Juan ve arkadaşlarının çalışması, fren balatası kompozitlerinin mekanik özelliklerini araştırmıştır. Bu kapsamda, organik atıkların (şam fıstığı ve hindistan cevizi kabukları gibi) fren balatası üretiminde kullanılabileceği belirtilmiştir. Genel olarak, test sonuçları, şam fıstığı kabuğu ve hindistan cevizi kabuğu içeren fren balatası malzemelerinin daha uzun aşınma ömrü, daha az tozlanma, daha yüksek durma performansı ve güvenlik sağladığını göstermiştir. Ayrıca, bu malzemelerin kullanımıyla daha yoğun ve daha az reçine içeren, daha sessiz ve güvenilir bir frenleme performansı sunan balatalar üretilebileceği ortaya konmuştur [75].

3.6. Diğer Doğal Liflerin Fren Balatası Uygulamalarında Kullanımı

Diğer doğal lifler ile ilgili kullanılan bitkisel lifler Şekil 7'de verilmiştir.

3.6.1. Mimosa Pudica (Küstüm Otu) Lifleri: Raghunathan ve arkadaşları, silanla işlenmiş ve işlenmemiş Mimosa pudica (MP) lifleri kullanılarak üretilen fren balatalarının özelliklerini incelemişlerdir. Çalışmada, silanla işlenmiş liflerin %57,2'lik daha yüksek selüloz içeriğine sahip olduğu, işlenmemiş liflerde bu oranın %48,7 olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, %5 ağırlıkta silanla işlenmiş lifler içeren fren balatalarının daha yüksek Rockwell sertlik değeri (95) sergilediği gözlemlenmiştir. Aşınma kaybı açısından ise %10 ağırlıkta silanla işlenmiş MP lifleri içeren fren balatalarının, diğer kompozitlere göre daha düşük olduğu belirlenmiştir. Sonuç olarak, silanla işlenmiş Mimosa pudica liflerinin fren balatalarında kullanıldığında iyileştirilmiş özellikler sağladığı ve aşınma oranını düşürdüğü sonucuna varılmıştır [76].



Şekil 7. Diğer Bitkisel Lifler

3.6.2. Caryota Urens (Sago Palmiyesi) Lifleri: Sai Krishnan ve arkadaşlarının çalışması, Caryota urens liflerinin fren sürtünme malzemeleri formülasyonunda etkili bir takviye olarak kullanılabileceği sonucuna varmıştır [77].

3.6.3. Zylon Lifleri: Kalel ve arkadaşlarının çalışması, Zylon liflerinin fren balatası uygulamalarında kullanışlı olduğunu ve hatta performans artırıcı bir rol oynayabileceğini öne sürmektedir [78].

4. Bitkisel Doğal Liflerin Fren Balatası Performanslarına Etkisi ve Kimyasal Özellikleri

Tablo 1. Çeşitli Bitkisel Liflerin Kimyasal Bileşim Özellikleri

Lif Türü	Selüloz (%)	Hemiselüloz (%)	Lignin (%)	Kül (%)	Referans
Citrullus lanatus	21.4	-	-	12.3	[79]
Jüt	61-71	13-20	12-13	0.8	[80]
Kenaf	45-57	20-21	15-18	1.0	[81]
Aloe vera	34.5	17	13.5	-	[82]
Cantala	67.8	13.5	11.1	-	[83]
Allium sativum	40.8	22	13.5	5.3	[84]
Ananas lifi	70-82	12-18	5-12	1.1	[85]
Areva javanica	58.2	18.3	14.6	2.5	[86]
Bambu	40-55	20-25	20-30	1.2	[87]
Hindistancevizi lifi	36-43	17-23	41-45	1.2-2.2	[88]
Palmiye çekirdeği	33-37	20-25	29-34	2.5	[89]
Sisal	65-70	10-14	8-12	0.8	[90]
Napier otu	39.4	27.6	18.2	3.3	[91]
Kenevir	68-76	15-18	3-10	0.5-1.2	[92]
Rami	68-76	13-16	0.6-1.2	1.1	[93]
Şam fıstığı kabuğu	37.5	24.3	28.2	1.8	[94]
Şeker kamışı lifleri	45.1	28.8	19.2	2.1	[95]
Muz kabuğu	7.6	14.3	6.4	3.2	[96]
Miscantus	39-52	24-28	8-12	1.9-3.9	[97]
Luffa cylindrica	60-65	20-24	10-12	1.1	[98]
Yağlı fasulye sapı	38.5-45.2	25.4-28.1	14.5-18.2	5.1	[99]

Tablo 1’de fren balatası üretiminde doğal liflerin kullanımı, asbest gibi zararlı maddelere sürdürülebilir ve çevre dostu bir alternatif sunmaktadır. Bu liflerin kimyasal bileşimi, fren balatasının yüksek sıcaklık dayanımı, aşınma direnci, sürtünme katsayısı ve mekanik dayanım gibi kritik özelliklerini doğrudan etkiler. Öncelikle, yüksek selüloz içeriğine sahip lifler, fren balatasının mekanik dayanımını ve bütünlüğünü artırarak kopma ve deformasyona karşı direnç sağlar. Tablo 7. Verilere göre örneğin, Ananas lifi (%70-82), Jüt (%61-71), Rami (%68-76), Kenevir (%68-76), Luffa cylindrica (%60-65) ve Sisal (%65-70) gibi lifler, yüksek çekme mukavemeti sağlayarak balatanın yapısal stabilitesine katkıda bulunur. İkinci olarak, lignin içeriği liflerin termal stabilitesi ve basma mukavemeti açısından büyük önem taşır; zira frenleme sırasında ortaya çıkan yüksek sıcaklıklara dayanıklılık lignin oranıyla doğru orantılıdır. Bu bağlamda,

Hindistancevizi lifi (%41-45), Palmiye çekirdeği (%29-34), Bambu (%20-30) ve Şeker kamışı lifleri (%19,2) gibi lignin açısından zengin lifler öne çıkmaktadır. Üçüncü olarak, kül oranı, lifin yanıcı olmayan mineral içeriğini gösterir ve fren balatası uygulamalarında genellikle düşük olması tercih edilir; yüksek mineral içeriği aşındırıcı olabilir veya bağlayıcı reçine ile uyumsuzluk yaratabilir. Jüt (%0,8), Kenaf (%1,0), Ananas lifi (%1,1), Bambu (%1,2), Sisal (%0,8), Kenevir (%0,5-1,2), Rami (%0,6-1,2) ve Luffa cylindrica (%1,1) gibi lifler düşük kül oranlarıyla avantaj sağlarken, Citrullus lanatus (%12,3), Allium sativum (%5,3) ve Yağlı fasulye sapı (%5,1) gibi yüksek kül oranına sahip lifler fren balatası performansında dezavantaj oluşturabilir. Son olarak, hemiselüloz içeriği liflerin termal bozunma direncini etkiler; fren balatalarının maruz kaldığı yüksek sıcaklıklar göz önüne alındığında, nispeten daha düşük hemiselüloz oranına sahip lifler tercih edilebilir.

Tablo 2. Aşınma Oranı ve Sürtünme Katsayısı Karşılaştırılması

Lif Adı	Aşınma Oranı/Aşınma Direnci	Sürtünme Katsayısı	Referans
Kenevir	3.5417×10^{-5} - 3.8340×10^{-5} mm ³ /Nm	0.4496- 0.4847	[40]
Ananas	0.030 mm ³ /Nm	0.43	[39]
Albizia Chinensis	1.1×10^{-8} - 2.3×10^{-8} g/sn.mm ²	0.5- 0.7	[41]
Cyperus Pangorei	3.2- 4.6 cm ² /g	0.3- 0.55	[46]
Sisal	10 N'da yaklaşık 0.5×10^{-6} mm ³ /Nm; 40 N'da 1.5×10^{-6} mm ³ /Nm	0.28- 0.35	[47]
Jüt	10 N yükte yaklaşık 0.75×10^{-6} mm ³ /Nm; 40 N yükte yaklaşık 2.0×10^{-6} mm ³ /Nm	0.30- 0.38	[47]
Sansevieria Ehrenbergii	-	İşlenmemiş lif: 0.32- 0.38; Kimyasal işlemler: 0.34- 0.42	[48]
Cortaderia Selloana	CDS12: Yaklaşık 0.18×10^7 cm ³ /Nm; CDS15: Yaklaşık 0.28×10^7 cm ³ /Nm; CDS18: Yaklaşık 0.34×10^7 cm ³ /Nm	0.30	[69]
Bambu	BF-1 (1.07 g)- BF-4 (1.45 g)	Başlangıç: BF-1 (0.39), BF-2 (0.37), BF-3 (0.34), BF-4 (0.30), FK-1 (0.40), FK-2 (0.371); PAN ve Kevlar yüzdesi artışıyla: BF-1 (0.58), BF-2 (0.76), BF-3 (0.545), BF-4 (0.518), FK-1 (0.58), FK-2 (0.66)	[49]
Hindistancevizi	CF-1 kompoziti 1.25g (en düşük); CF-4 kompoziti 1.50g (en yüksek)	-	[53]
Hurma	3.21 mg/m- 3,96 mg/m	-	[58]
Miscantus	Mat1 (%5 lif): %4; Mat2 (%10 lif): %5	Mat1 (%5 lif): 0.43; Mat2 (%10 lif): 0.41	[60]
Citrullus Lanatus	-	0.3- 0.45	[61]
Şeker Kamışı	Şeker Kamışı %5: 4.88×10^{-7} ; Şeker Kamışı %20: 3.01×10^{-7}	Şeker Kamışı %5: 0.368; Şeker Kamışı %20: 0.395	[62]
Muz Kabuğu	1.39×10^{-7} - 1.69×10^{-7} cm ³ /Nm	0.31- 0.39	[63]
Su Sümbülü	-	Silanla işlenmiş: 0.079; Alkali ile işlenmiş: 0.086; İşlem görmemiş: 0.104	[66]
Cardiospermum Halicacabum	Silan işlem görmüş: Yaklaşık 1.5×10^{-10} cm ³ /Nm; İşlem görmemiş: Yaklaşık 2.5×10^{-10} cm ³ /Nm	0.40- 0.42	[71]
Palmiye Çekirdeği	1.46- 1.84	0.325- 0.365	[72]
Elaeocarpus Ganitrus	1.5766×10^{-7} - 2.2694×10^{-7} mm ² /kg	0.34- 0.5	[73]
Mısır Koçanı	4.470×10^{-6} g/m	0.37	[74]
Şam Fıstığı	3.67×10^{-5} - 5.28×10^{-5} g/mm ² .s	-	[75]
Allium Sativum	1.87×10^{-5} mm ³ /Nm	0.52	[67]
Lycium Ferocissimum	0.88×10^{-9} - 1.22×10^{-9} mm ³ /Nm	0.36- 0.42	[68]
Mimosa Pudica	1.104×10^{-11} - 1.201×10^{-11} mm ³ /Nm	0.332- 0.339	[76]
Caryota Urens	1.29- 1.57	0.36- 0.40	[77]
Zylon	1.0×10^{-7} - 3.0×10^{-7} mm ³ /Nm	0.35- 0.45	[78]

Tablo 2’de farklı doğal elyaf bileşimi içeren çalışmalara ait aşınma oranı ve sürtünme katsayısı karşılaştırmaları verilmiştir. Yapılan çalışmalar göz önüne alındığında, doğal liflerin fren balataları uygulamalarındaki uygulanabilirliği, mekanik dayanım, sürtünme performansı, aşınma direnci ve çevresel sürdürülebilirlik açısından önemli bir potansiyel taşımaktadır. Bu lifler, özellikle asbest ve sentetik bazlı malzemelerin yerine geçerek daha hafif, biyolojik olarak parçalanabilir ve maliyet etkin alternatifler sunmaktadır. Liflerin kimyasal veya mekanik işlemlerle yüzey modifikasyonu, lif-matris arayüzey bağlanmasını optimize ederek nihai kompozit malzemenin performansını artırmaktadır. Örneğin, jüt liflerinin sergilediği üstün mekanik özellikler, kenevir liflerinin çevresel kirliliği azaltma potansiyeli ve hindistancevizi liflerinin yüksek ısı kararlılığı gibi spesifik avantajlar, doğal liflerin fren balatası üretiminde başarılı bir şekilde entegre edilebileceğini ortaya koymaktadır. Bu bulgular, doğal liflerin otomotiv sektöründe hem teknik açıdan verimli hem de çevresel açıdan sorumlu bir alternatif olarak geniş çapta uygulanabilirliğini desteklemektedir.

5. Sonuçlar

Yasaklanan bazı fren balatası bileşenlerinin çevresel etkileri, biyolojik olarak parçalanabilen bitkisel doğal liflere olan ilgiyi artırmıştır. Bu lifler hem sürdürülebilirlik ilkelerine uygun olmaları hem de bol miktarda ve düşük maliyetle temin edilebilmeleri nedeniyle araştırmalarda ön plana çıkmaktadır.

Bu çalışmada, *Citrullus lanatus*, jüt, kenaf, *Aloe vera*, *cantala*, *Allium sativum*, ananas, *Areva javanica*, bambu, hindistancevizi, palmye çekirdeği, sisal, Napier otu, kenevir, rami, şam fıstığı kabuğu, şeker kamışı, muz, *Miscanthus*, yağlı fasulye sapı ve su sümbülü gibi çeşitli bitkisel doğal liflerin fren balatalarındaki sürtünme katsayısı ve aşınma oranı üzerindeki etkileri, literatürdeki bilimsel çalışmalar temel alınarak değerlendirilmiştir.

Elde edilen bulgular, bazı doğal lif türlerinde istenen performans kriterlerine tam olarak ulaşılamamış olsa da büyük çoğunluğunun sürtünme katsayısı ve aşınma dayanımı açısından olumlu ve anlamlı sonuçlar verdiğini ortaya koymuştur. Bu doğrultuda, bitkisel doğal liflerin fren balatalarında takviye malzemesi olarak kullanımı hem teknik yeterlilik hem de çevresel faydalar bakımından son derece uygun görünmektedir.

Sonuç olarak, bu alanda yapılacak daha kapsamlı ve sistematik çalışmalarla, doğal liflerin fren balatalarındaki uygulama potansiyelinin daha da artırılacağı ve çevre dostu, sürdürülebilir çözümler geliştirilmesine önemli katkılar sağlanabileceği değerlendirilmektedir.

Kaynaklar

- [1] Limpert R. *Brake Design and Safely Third Edition*, <http://books.sae.org> (2011).
- [2] Liu L., Liu X., Wang X., et al. Reliability analysis and evaluation of a brake system based on competing risks. *Journal of Engineering Research* 2017; 150–162.
- [3] Erdem M, Altıparmak D. Fren Disk Sıcaklığının Frenleme Performansına Etkisi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi* 2014; 29: 425–432.
- [4] Ria Jaafar T, Kasiran R, Soib Selamat M. Selection of Best Formulation for Semi-Metallic Brake Friction Materials Development. Epub ahead of print March 2012. DOI: 10.13140/2.1.1222.2404.
- [5] Darius GS, Berhan MN, David N V, et al. Characterization of brake pad friction materials. *WIT Transactions on Engineering Sciences*; 51, www.witpress.com, (2005).
- [6] Eckermann E. The first automobile. *World History of the Automobile* 2001; 14.
- [7] Maluf O, Angeloni M, Spinelli D. *Development of materials for automotive disc brakes*, <https://www.researchgate.net/publication/237710289>.
- [8] Marwah AK. Braking Systems: Past, Present & Future. *Paripex - Indian Journal Of Research*; 2, <https://www.researchgate.net/publication/390122951> (2013).
- [9] Beck MH. Brake-Lining Workers. *Handbook of Occupational Dermatology* 2000; 847–849.
- [10] Kumar N, Bharti A, Goyal HS, et al. THE EVOLUTION of BRAKE FRICTION MATERIALS: A REVIEW. *Materials Physics and Mechanics* 2021; 47: 796–815.
- [11] Blau P. J. Compositions, Functions, and Testing of Friction Brake Materials and Their Additives. *Office of Transportation Technologies*, <http://www.ntis.gov/suppotVordernowabout.htm> (2001).

- [12] Xiao X, Yin Y, Bao J, et al. Review on the friction and wear of brake materials. *Advances in Mechanical Engineering* 2016; 8: 1–10.
- [13] Hulskotte JHJ, Roskam GD, Denier van der Gon HAC. Elemental composition of current automotive braking materials and derived air emission factors. *Atmos Environ* 2014; 99: 436–445.
- [14] Shi S. Automobile Brake System.
- [15] Chan D, Stachowiak GW. Review of automotive brake friction materials. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering* 2004; 218: 953–966.
- [16] Österle W, Dmitriev AI. The Role of Solid Lubricants for Brake Friction Materials. *Lubricants* 2016, Vol 4, Page 5 2016; 4: 5.
- [17] Bijwe J, Nidhi, Majumdar N, et al. Influence of modified phenolic resins on the fade and recovery behavior of friction materials. *Wear* 2005; 259: 1068–1078.
- [18] Kato T, Magario A. The wear of aramid fiber reinforced brake pads: The role of aramid fibers. *Tribology Transactions* 1994; 37: 559–565.
- [19] Ammar Z, Ibrahim H, Adly M, et al. Influence of Natural Fiber Content on the Frictional Material of Brake Pads—A Review. *Journal of Composites Science* 2023; 7: 72.
- [20] Sugözü B, Sugözü İ. Investigation of Friction and Wear Behavior of Boron Carbide Reinforced Composite Materials. *International Journal of Automotive Science And Technology* 2019; 3: 71–76.
- [21] Unal A, Akkus N. Analytical and experimental investigation of composite pads created by using coke dust against the fading problem in railway vehicles. *Proc Inst Mech Eng F J Rail Rapid Transit* 2023; 237: 218–223.
- [22] Menapace C, Leonardi M, Secchi M, et al. Thermal behavior of a phenolic resin for brake pad manufacturing. *J Therm Anal Calorim* 2019; 137: 759–766.
- [23] Marzouki A. *Thermo - Set Resin Composition For Brake Pads , Method Of Preparation , And Brake Pad Assembly*. 2017.
- [24] Irawan AP, Fitriyana DF, Tezara C, et al. Overview of the Important Factors Influencing the Performance of Eco-Friendly Brake Pads. *Polymers*; 14. Epub ahead of print 1 March 2022. DOI: 10.3390/polym14061180.
- [25] Lee WK, Rhee TH, Kim HS, et al. Effects of antimony trisulfide (Sb₂S₃) on sliding friction of automotive brake friction materials. *Metals and Materials International* 2013; 19: 1101–1107.
- [26] Cho MH, Ju J, Kim SJ, et al. Tribological properties of solid lubricants (graphite, Sb₂S₃, MoS₂) for automotive brake friction materials. *Wear* 2006; 260: 855–860.
- [27] Ertan R, Yavuz N. Balata Malzemelerinde Kullanılan Yapısalın Balatanın Tribolojik Ve Fiziksel Özelliklerine Etkisi. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*; 15.
- [28] Österle W, Griepentrog M, Gross T, et al. Chemical and microstructural changes induced by friction and wear of brakes. *Wear* 2001; 251: 1469–1476.
- [29] Balaji MAS, Kalaichelvan K, Mohanamurugan S, et al. Effect of varying cashew dust and resin on friction material formulation: stability and sensitivity of μ to pressure, speed and temperature. *Int J Surface Science and Engineering* 2014; 8: 327–344.
- [30] Venkatesh S, Murugapopathiraja K. Scoping Review of Brake Friction Material for Automotive. *Mater Today Proc* 2019; 16: 927–933.
- [31] Dirisu JO, Okokpujie IP, Apiafi PB, et al. Development of eco-friendly brake pads using industrial and agro-waste materials. *Journal of Engineering and Applied Science*; 71. Epub ahead of print December 2024. DOI: 10.1186/s44147-023-00345-y.

- [32] Gilardi R, Alzati L, Thiam M, et al. Copper substitution and noise reduction in brake pads: Graphite type selection. *Materials* 2012; 5: 2258–2269.
- [33] SUGÖZÜ İ, SUGÖZÜ B. Investigation of The Effect of Solid Lubricant Particle Sizes on Friction and Wear Properties in Friction Composites: An Experimental Case Study with Graphite. *International Journal of Automotive Science and Technology* 2021; 5: 179–183.
- [34] Yu K, Shang X, Zhao X, et al. Fiber-reinforced friction materials: Experimental, statistical and computational universal analysis. *Compos Struct* 2024; 338: 118122.
- [35] Ammar Z, Ibrahim H, Adly M, et al. Influence of Natural Fiber Content on the Frictional Material of Brake Pads—A Review. *Journal of Composites Science* 2023; 7: 72.
- [36] Muthu Samy M, Lenin Singaravelu D. Green friction: Exploring the evolution and potential of natural fibers and other brake pad ingredients in sustainable automotive engineering—A review. *Polym Compos* 2025; 46: 5882–5909.
- [37] Dilber Y, Kubilay E. Micromechanical Optimization And Sustainable Material Design Of Unidirectional Laminate Composite Materials With Natural Rrinforcements. In: *International Istanbul Scientific Research Congress On Life, Engineering, Architecture Ans Mathematical Sciences*. İstanbul, pp. 303–330.
- [38] Sri Karthikeyan [a] S, Balakrishnan E, Meganathan S, et al. Elemental Analysis Of Brake Pad Using Natural Fibres. *Mater Today Proc* 2019; 16: 1067–1074.
- [39] Singh T. Optimum design based on fabricated natural fiber reinforced automotive brake friction composites using hybrid CRITIC-MEW approach. *Journal of Materials Research and Technology* 2021; 14: 81–92.
- [40] Naidu M, Bhosale A, Munde Y, et al. Wear and Friction Analysis of Brake Pad Material Using Natural Hemp Fibers. *Polymers (Basel)*; 15. Epub ahead of print 1 January 2023. DOI: 10.3390/polym15010188.
- [41] Budiprasojo A, Rudiyanto B. Characteristics Of Albizia Chinensis Wood Organic Brake Pads Friction Coefficient, Wear Rate And Working Temperature By Variaty Of Composition. *Jurnal Ilmiah Rekayasa Pertanian dan Biosistem* 2023; 11: 26–33.
- [42] Obika EN, Achebe CH, Chukwunke JL, et al. Effect of cane wood and palm kernel fibre filler on the compressive strength and density of automobile brake pad. *Advances in Mechanical Engineering* 2020; 12: 1–9.
- [43] Kalayci E, Ozan Avinc O, Bozkurt A, et al. Tarımsal atıklardan elde edilen sürdürülebilir tekstil lifleri: Ananas yaprağı lifleri. *SAÜ Fen Bilimleri Dergisi* 2016; 20: 203–221.
- [44] Bellairu PK, Bhat S, Gijo E V. Modelling and optimisation of natural fibre reinforced polymer nanocomposite: application of mixture-design technique. *Multidiscipline Modeling in Materials and Structures* 2021; 17: 507–521.
- [45] Ahmed MJ, Balaji MS, Saravanakumar SS, et al. Characterization of Areva javanica fiber – A possible replacement for synthetic acrylic fiber in the disc brake pad. *Journal of Industrial Textiles* 2019; 49: 294–317.
- [46] Ganesh Babu L. Influence of benzoyl chloride treatment on the tribological characteristics of Cyperus pangorei fibers based non-asbestos brake friction composites. *Mater Res Express*; 7. Epub ahead of print 2020. DOI: 10.1088/2053-1591/ab54f1.
- [47] Manjulaiah H, Dhanraj S, Basavegowda Y, et al. A novel study on the development of sisal-jute fiber epoxy filler-based composites for brake pad application. *Biomass Convers Biorefin*. Epub ahead of print 1 October 2023. DOI: 10.1007/s13399-023-04219-4.
- [48] Senthil Kumaran S, Srinivasan K, Ponmariappan M, et al. Study of raw and chemically treated Sansevieria ehrenbergii fibers for brake pad application. *Mater Res Express*; 7. Epub ahead of print 1 May 2020. DOI: 10.1088/2053-1591/ab8f48.
- [49] Kumar N, Mehta V, Kumar S, et al. Bamboo natural fiber and PAN fiber used as a reinforced brake friction material: Developed asbestos-free brake pads. *Polym Compos* 2022; 43: 2888–2895.

- [50] Kumar N, Singh A, Singh S, et al. Napier natural fibre used as reinforcement polymer composite: As asbestos free brake friction material. *Mater Today Proc* 2022; 56: 2532–2536.
- [51] Kocaöz S. *Doğal Elyaf Takviyeli Koruyucu Tekstil Yapısı Geliştirilmesi*. Marmara Üniversitesi, 2023.
- [52] Bozacı AGE. Ananas Yaprak Lifi. 2007; 3: 167–169.
- [53] Ali S, Kumar N, Grewal JSG, et al. Coconut waste fiber used as brake pad reinforcement polymer composite and compared to standard Kevlar-based brake pads to produce an asbestos free brake friction material. *Polym Compos* 2022; 43: 1518–1525.
- [54] Craciun AL, Pinca-Bretotean C, Utu D, et al. Tribological properties of nonasbestos brake pad material by using coconut fiber. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Institute of Physics Publishing, 2017. Epub ahead of print 6 January 2017. DOI: 10.1088/1757-899X/163/1/012014.
- [55] Ashok Kumar I, Jeya Kumar AA, Prakash M. Thermal Characterization of Flax/Basalt Fiber Reinforced Phenol Resin Brake Pad Material: Effective Replacement of Asbestos. *Journal of Natural Fibers* 2021; 18: 1384–1394.
- [56] Maleque MA, Atiqah A. Development and Characterization of Coir Fibre Reinforced Composite Brake Friction Materials. *Arab J Sci Eng* 2013; 38: 3191–3199.
- [57] Sekar MS. Organic Waste Brake Pad by using Luffa Cylindrical. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*; 7, www.ijert.org (2019).
- [58] Mobi IM, Achebe CH, Okafor CE. Optimization of Mechanical Properties of Palm Fruit Fiber Automobile Brake Pad 1. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*; 10, www.ijert.org (2021).
- [59] Gibson LJ. The hierarchical structure and mechanics of plant materials. *J R Soc Interface* 2012; 9: 2749–2766.
- [60] Kchaou M, Kus R, Singaravelu DL, et al. Design, characterization, and performance analysis of Miscanthus fiber reinforced composite for brake application. *Journal of Engineering Research (Kuwait)* 2021; 9: 222–234.
- [61] Paramathma BS, Sundaram M, Palani V, et al. Characterization of Silane Treated and Untreated Citrullus lanatus Fibers Based eco-friendly Automotive Brake Friction Composites. *Journal of Natural Fibers* 2022; 19: 13273–13287.
- [62] Mehta V, Kumar N, Algahtani A, et al. Comparative Study of Chemically Treated Sugarcane and Kevlar Fiber to Develop Brake Resistance Composites. *Molecules*; 28. Epub ahead of print 1 June 2023. DOI: 10.3390/molecules28124861.
- [63] Sugözü B, Sugözü İ. Investigation of the Use of a New Binder Material in Automotive Brake Pad. *International Journal of Automotive Science and Technology* 2020; 4: 258–263.
- [64] Ammar Z, Ibrahim H, Adly M, et al. Influence of Natural Fiber Content on the Frictional Material of Brake Pads—A Review. *Journal of Composites Science* 2023; 7: 72.
- [65] Dirisu JO, Okokpuje IP, Apiafi PB, et al. Development of eco-friendly brake pads using industrial and agro-waste materials. *Journal of Engineering and Applied Science*; 71. Epub ahead of print December 2024. DOI: 10.1186/s44147-023-00345-y.
- [66] Palai BK, Sarangi SK. Suitability evaluation of untreated and surface-modified Eichhornia crassipes fibers for brake pad applications. *Journal of Natural Fibers* 2022; 19: 5395–5408.
- [67] Kumar VV, Dhanalakshmi S, Raghunathan V, et al. Characterization of Allium sativum stalk-based biomass for automotive brake pad applications. *Biomass Convers Biorefin*. Epub ahead of print 1 March 2024. DOI: 10.1007/s13399-024-05590-6.
- [68] Ganesh S, Saraswathy JL, Raghunathan V, et al. Friction composite formulation from Lycium ferocissimum fibers as natural reinforcement for braking applications. *Express Polym Lett* 2024; 18: 144–159.
- [69] Yavuz H, Bayrakçeken H, Çengelci E, et al. An investigation on the performance of vehicle brake pads developed from Cortaderia selloana based biomass. *Biomass Convers Biorefin* 2024; 15: 5293–5302.

- [70] Bulut Y, Erdoğan ÜH. Selülöz Esaslı Doğal Liflerin Kompozit Üretiminde Takviye Materyali Olarak Kullanımı. *The Journal of Textiles and Engineer* 2011; 18: 27.
- [71] Raghunathan V, Sathyamoorthy G, Ayyappan V, et al. Effective utilization of surface-processed/untreated *Cardiospermum halicababum* agro-waste fiber for automobile brake pads and its tribological performance. *Tribol Int*; 197. Epub ahead of print 1 September 2024. DOI: 10.1016/j.triboint.2024.109776.
- [72] Sai Krishnan G, Ganesh Babu L, Pradhan R, et al. Study on tribological properties of palm kernel fiber for brake pad applications. *Mater Res Express*; 7. Epub ahead of print 2019. DOI: 10.1088/2053-1591/ab5af5.
- [73] Afiefudin M, Widodo RD, Rusiyanto. Fabrication and Characterization of Asbestos Free Brake Pads Composite using *Elaeocarpus Ganitrus* as Reinforcement. *Automotive Experiences* 2023; 6: 359–371.
- [74] Ademoh NA, Olabisi AI. Development and Evaluation of Maize Husks (Asbestos-Free) Based Brake Pad. 5, www.iiste.org (2015).
- [75] Juan RS, Kurniawan C, Marbun J, et al. Mechanical properties of brake pad composite made from candlenut shell and coconut shell. In: *Journal of Physics: Conference Series*. Institute of Physics Publishing, 2020. Epub ahead of print 7 January 2020. DOI: 10.1088/1742-6596/1428/1/012018.
- [76] Raghunathan V, Gnanasekaran S, Ayyappan V, et al. Sustainable characterization of brake pads using raw/silane-treated *Mimosa pudica* fibers for automobile applications. *Polym Compos* 2024; 45: 10204–10219.
- [77] Sai Krishnan G, Ganesh Babu L, Kumaran P, et al. Investigation of *Caryota urens* fibers on physical, chemical, mechanical and tribological properties for brake pad applications. *Mater Res Express*; 7. Epub ahead of print 2019. DOI: 10.1088/2053-1591/ab5d5b.
- [78] Kalel N, Bhatt B, Darpe A, et al. Exploration of Zylon fibers with various aspect ratios to enhance the performance of eco-friendly brake-pads. *Tribol Int*; 167. Epub ahead of print 1 March 2022. DOI: 10.1016/j.triboint.2021.107385.
- [79] Olayinka B.U., Etejere E.O. Proximate and Chemical Compositions of Watermelon (*Citrullus lanatus* (Thunb.) Matsum and Nakai cv Red and Cucumber (*Cucumis sativus* L. cv Pipino). *International Food Research* 2018; 25: 1060–1066.
- [80] Chokshi S, Parmar V, Gohil P, et al. Chemical Composition and Mechanical Properties of Natural Fibers. *Journal of Natural Fibers* 2022; 19: 3942–3953.
- [81] Wang C, Bai S, Yue X, et al. Relationship between chemical composition, crystallinity, orientation and tensile strength of kenaf fiber. *Fibers and Polymers* 2016; 17: 1757–1764.
- [82] Hussain F, Ahmed M. Chemical Composition and Biochemical Activity of *Aloe vera* (*Aloe barbadensis* Miller) Leaves. *International Journal of Chemical and Biochemical Sciences* 2013; 3: 29–33.
- [83] Raharjo WW, Soenoko R, Irawan YS, et al. The Influence of Chemical Treatments on Cantala Fiber Properties and Interfacial Bonding of Cantala Fiber/Recycled High Density Polyethylene (rHDPE). *Journal of Natural Fibers* 2018; 15: 98–111.
- [84] Kumar VV, Dhanalakshmi S, Raghunathan V, et al. Characterization of *Allium sativum* stalk-based biomass for automotive brake pad applications. *Biomass Convers Biorefin* 2024; 15: 9215–9228.
- [85] Asim M, Abdan K, Jawaid M, et al. A Review on Pineapple Leaves Fibre and Its Composites. *Int J Polym Sci* 2015; 2015: 950567.
- [86] Ahmed J, Sai Balaji MA, Saravanakumar SS, et al. Characterization of *Areva javanica* fiber-A possible replacement for synthetic acrylic fiber in the disc brake pad. 2019; 49: 294–317.
- [87] Yuan J, Chen Q, Fang C, et al. Effect of chemical composition of bamboo fibers on water sorption. *Cellulose* 2021; 28: 7273–7282.

- [88] Arsyad M, Wardana ING, Pratikto, et al. The morphology of coconut fiber surface under chemical treatment. *Revista Materia* 2015; 20: 169–177.
- [89] Baffour-Awuah E., Akinlabi S.A., Jen T.C., et al. Characteristics of Palm Kernel Shell and Palm Kernel Shell-Polymer Composites: A Review. *Materials Science and Engineering*. Epub ahead of print 2021. DOI: 10.1088/1757-899X/1107/1/012090.
- [90] Akram Khan M, Guru S, Padmakaran P, et al. Characterisation studies and impact of chemical treatment on mechanical properties of sisal fiber. *Compos Interfaces* 2011; 18: 527–541.
- [91] Reddy KO, Maheswari CU, Shukla M, et al. Chemical composition and structural characterization of Napier grass fibers. *Mater Lett* 2012; 67: 35–38.
- [92] Jankauskiene Z, Butkute B, Gruzdeviene E, et al. Chemical composition and physical properties of dew- and water-retted hemp fibers. *Ind Crops Prod* 2015; 75: 206–211.
- [93] Li X, Tabil LG, Panigrahi S. Chemical treatments of natural fiber for use in natural fiber-reinforced composites: A review. *J Polym Environ* 2007; 15: 25–33.
- [94] Balasundar P, Narayanasamy P, Senthil S, et al. Physico-chemical study of pistachio (*Pistacia vera*) nutshell particles as a bio-filler for eco-friendly composites. *Mater Res Express* 2019; 6: 105339.
- [95] Tabei A. Study of Morphological and Chemical Composition of Fibers from Iranian Sugarcane Bagasse, https://www.academia.edu/64987849/Study_of_Morphological_and_Chemical_Composition_of_Fibers_from_Iranian_Sugarcane_Bagasse (2011, accessed 31 May 2025).
- [96] Wachirasiri P, Julakarangka S, Wanlapa S. The effects of banana peel preparations on the properties of banana peel dietary fibre concentrate. *Songklanakarin J Sci Technol* 2009; 605–611.
- [97] Yaşar S. Miscanthus (*Fil Çimeni*) Giganteus, Miscanthus Goliath ve Miscanthus Silberfahne’de Selüloz, Hemiselüloz ve Lignin Miktarlarının Karşılaştırılması. *Turkish Journal of Forestry* 2009; 3: 27–40.
- [98] Mohanta N, Acharya SK. Fiber surface treatment: Its effect on structural, thermal, and mechanical properties of *Luffa cylindrica* fiber and its composite. *J Compos Mater* 2016; 50: 3117–3131.
- [99] Liu Z, Cao Y, Wang Z, et al. Soy straw. Pt. 1, characterization. *Bioresources* 2015; 10: 2266–2280.