

Biyokökenli Sürdürülebilir Akustik Yalıtım Malzemesi Olarak Kaz Tüyü Liflerinin Morfolojik Olarak İncelenmesi

Süreyya Kocatepe¹

Özet

Son yıllarda, biyolojik kökenli lifli yapılar, sentetik akustik malzemelere sürdürülebilir alternatifler olarak önemli ölçüde dikkat çekmektedir. Bir takım doğal liflere bakıldığında, kuş tüylerinin kullanımı akustik yalıtım uygulamalarında çok fazl tercih edilen bir malzeme olmasada, son yıllarda yapılan çalışmalara bakıldığında bu malzemenin alternatif olarak umut vaad eden bir malzeme olduğu görülmektedir. Bu çalışmada kaz tüyleri morfolojik açıdan değerlendirilerek, kaz tüyü liflerinin benzersiz bir biçimde akustik alanda yüksek seviye kullanım bulabileceğini destekler niteliktedir. Liflerin dallı bir yapıda olmasının yanı sıra içyapısının boşluklu olması gözenekli bir lif olarak bu malzemeyi akustik sektöründe kullanmak için oldukça elverişli kılmaktadır. Konvansiyonel doğal liflerin aksine, düşük yoğunlukta olmaları, içyapıda havayı hapsedmeleri ve düzensiz gözenek topolojisi kavramlarının birleşimi yüksek derece bu malzemenin sesi sönümleme potansiyelinin olacağına işaret etmektedir. Tüylerde bulunan liflerin dikensi yapıların inceliği, dallanma yoğunluğu ve yüzey pürüzlülüğünün malzemedeki hava akış direncini ve enerji dağılım mekanizmalarını etkileyerek sesin sönümlemesine imkân vereceğini vaat etmektedir. Ancak liflerin akustik davranışlarını ele alan sistematik çalışmalar bu alanda oldukça sınırlıdır. O nedenle bu çalışma mevcut literatür bilgilerini sentezleyerek ve ses yutum performansı için yapı temelli hipotezler önererek literatürde var olan kritik boşluğu doldurmaktadır. Kaz tüylerinin yenilenebilir, hafif ve biyolojik olarak parçalanabilen bir malzeme olarak yeni nesil biyobazlı akustik ses yalıtım malzemelerinin geliştirilmesini desteklemeyi amaçlamaktadır.

1 Dr. Öğr. Üyesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ Organize Sanayi Bölgesi MYO, Tekstil, Giyim, Ayakkabı ve Deri Bölümü, Elazığ/Türkiye, sureyya.kocatepe@hotmail.com, ORCID ID: 0000-0001-8084-0699

1. Giriş

Gürültü kirliliğine yönelik oluşan endişe, dünya genelinde ekonomik olarak ilerleme, teknolojik gelişim ve kentsel genişleme ile birlikte artmış durumdadır. Gürültüye maruz kalmanın olumsuz sonuçları arasında ciddi işitme kaybı, yüksek tansiyon, artan nefes hızı, kardiyovasküler rahatsızlıkların başlaması, sindirim bozuklukları, davranışsal ve psikolojik anomaliler, stres ve uyku bozuklukları gibi işitsel olmayan etkiler görülmektedir [Sheikhmozafari ve ark., 2021].

Değişen dünya düzeni ile birlikte kentsel nüfusun yoğunlaşması ve endüstriyel ortamlarda gürültünün artması, insan sağlığı üzerinde bir takım olumsuz sonuçlar oluşturmaktadır. Meydana gelen bu olumsuz durum ise hafif yapı elemanları ve iç mekân tasarımlarında etkili akustik çözümlerin geliştirilmesi konusunda meydana gelen ihtiyacı güçlendirmektedir. Özellikle iç mekân yapılar, otomotiv ve taşımacılık sektöründe ağırlık bakımından hafif, çevre dostu ve yüksek performanslı ses yalıtım malzemelerine olan talep giderek artmış durumdadır. Bu açıdan değerlendirildiğinde petrokimyasal bazlı geleneksel ses yalıtık malzemelerinin çevresel düzeyde maliyeri ve geri dönüşüm sorunları ele alındığında biyokökenli alternatif malzemelerin araştırılması ve piyasaya çıkarılması hız kazanmıştır [Lashgari ve ark., 2024].

Yapılan çalışmalara bakıldığında son senelerde doğal ve geri dönüştürülmüş malzemelere duyulan ilginin artması, bu malzemelerin sadece çevresel ve sağlık üzerindeki etkilerin azatılmasına katkı sunmadığı, aynı zamanda ekonomik olarak ciddi bir fırsat sunduğu görülmektedir. Tüm bu faktörler bir araya geldiğinde daha sürdürülebilir ve ekonomik olarak daha uygulanabilir çözüm arayışlarını beraberinde getirmiştir. Bu alandaki araştırmalar 2 geniş kategoride değerlendirilebilir: Birinci kategori yalnızca ham doğal elyaf malzemelerinin kullanılması ve bu malzemelerin incelenmesine adanmış çalışmaları içerirken, ikinci kategori ise genellikle biyokompozitler olarak isimlendirilen polimer matris içinde takviye olarak doğal elyafların kullanıldığı araştırmaları kapsamaktadır [Arenas ve ark.,2020].

Yapısal olarak lifli ve gözenekli malzemeler, ses enerjisinin yapı içinde viskoz ve termal kayıplarla dönüştürülmesine dayanan mekanizmaları ile birlikte akustik alandaki uygulamalarda uzun zamandır tercih edilmektedir. Lif çapı, gözenek boyutu dağılımı, porozite, akış direnci (airflow resistivity) ve yapı tortuozitesi gibi mikro ölçek parametreler; malzemenin frekans bağımlı ses yutma performansını belirler. Bununla birlikte, doğal liflerden üretilen paneller ve kompozitler (ör. kenaf, jüt, hindistancevizi, kenevir) üzerinde yapılan son çalışmalarda, uygun işlem ve sıkıştırma koşullarıyla doğal liflerin geniş bantlı ses yutma potansiyeli gösterdiği raporlanmıştır.

Bu çalışmalar doğal liflerin hem sürdürülebilir hem de rekabetçi akustik çözümler sağlayabileceğini desteklemektedir [Yang ve ark., 2020].

Bununla birlikte, doğrudan avian (kuş) tüyleri özellikle kaz ve ördek tüyleri, akustik literatürde ihmal edilen bir alan olarak kalmıştır. Son birkaç yılda atık kuş tüylerinden elde edilen kompozitlerin ve katmanlı tüy matlarının ses yutma özelliklerini gösteren deneysel çalışmalar ortaya çıkmaya başlamış; örneğin tavuk-tüyü ve diğer kuş tüyü bazlı numuneler orta yüksek frekans aralığında umut verici performans göstermiştir [Pasayev ve ark., 2018]. Ancak bu çalışmalar hâlen sınırlı sayıda olup, tüylerin hiyerarşik morfolojisinin (calamus/quill, barb, barbu) akustik etkileri sistematik olarak ele alınmamıştır. Dolayısıyla kuş tüyleri, hem bol bulunurlukları hem de benzersiz yapısal özellikleri nedeniyle incelenmeye değerdir [Artayani, M., 2024].

Akustik performansın doğru anlaşılabilmesi için sadece makro parametrelere (kalınlık, yoğunluk, gramaj) bakmak yetersiz kalır; malzeme içindeki mikro ve mezo ölçek yapının doğrudan karakterizasyonu gereklidir. Bu nedenle SEM (Scanning Electron Microscopy) analizleri, tüy liflerinin dallanma yoğunluğu, lumen hacmi, yüzey pürüzlülüğü ve boşluk topolojisi gibi kritik morfolojik öğeleri nicel ve nitel olarak ortaya koymak için vazgeçilmez bir araçtır. SEM tabanlı morfolojik veriler, mevcut poröz malzeme modelleri ve akustik kuramsal çerçevelerle (ör. JCAL / Champoux–Allard, Delany–Bazley gibi yaklaşımlar) ilişkilendirildiğinde, tüylerin hangi frekans bantlarında ve hangi mekanizmalarla (viskoz sürtünme, termal kayıp, rezonans, çoklu saçılma) etkili olabileceği konusunda sağlam hipotezler üretilir [Yang, 2020].

Bu çalışmanın amacı, kaz tüyü liflerinin hiyerarşik morfolojisini SEM analizleriyle sistematik olarak betimleyip, gözlemlenen yapısal özelliklerin akustik yalıtım (transmission loss ve/veya absorption) açısından taşıdığı potansiyeli kavramsal olarak ortaya koymaktır. Deneysel ölçüm metodlarından empadas tüpü, reverbasyon kabini vb. çalışmalar bu çalışmanın dışında tutulmaktadır. Mevcut literatür çalışmaları ışığında SEM çalışmaları yardımıyla yapı-işlev bağlantısı kurularak tüy esaslı akustik malzemelerin tasarlanmasına yönelik somut anlamda önerilerin getirilmesi hedeflenmiştir. Bu yaklaşımla hem sürdürülebilirlik hedefleri hem de hafif yapı uygulamaları bakımından yeni araştırma yolları açması beklenmektedir.

2. Doğal Liflerle Akustik Yalıtımın Teorik Temelleri

2.1. Gözenekli Lifli Malzemelerde Ses Malzeme Etkileşiminin Temeli

Gözenekli malzemelerde ses yutma temel olarak havanın lifli matris içinde ilerlerken yüzeylerle etkileşmesi sonucu oluşan viskoz ve termal kayıplara dayanır; küçük gözeneklerde hava akışı sınır tabakaları oluşturur ve bu sınır tabakalarında sürtünme, enerjiyi ısıya dönüştürür. Doğal liflerin düzensiz lif yönelimi ve geniş yüzey-hacim oranı, bu mekanizmaların etkisini artırır. Son yıllarda yapılan derleme ve deneysel çalışmalar doğal liflerin uygun üretim/işleme koşullarında rekabetçi ses yutma performansı gösterebildiğini ortaya koymuştur [Moncayo ve ark., 2024].

2.2. Mikro Yapı Parametrelerinin Etkisi: Lif Çapı, Porozite ve Tortuozite

Akustik tepkiyi belirleyen ana parametreler lif çapı dağılımı, gözenek boyutu, porozite ve tortuozitedir. İnce lifler yüksek yüzey alanı sağlar ve yüksek frekanslarda viskoz kayıpları artırır; çok ölçekli (mikro-+mezo) porozite ise farklı frekans bantlarında enerji sönümü sağlar. Deneysel çalışmalarda, doğal lif panellerin (örn: çeşitli bitkisel lifler ve tüy tabanlı yapılar) bu heterojen mikro yapıları nedeniyle geniş bantlı performans gösterebildikleri bildirilmiştir [Abdul Aziz&Kamarul, 2021]

2.3. Akış Direnci (Airflow Resistivity): Ses Yutma Kapasitesinin Temel Göstergesi

Akış direnci (σ) bir gözenekli malzemenin akustik performansındaki en kritik niceliklerden biridir. Literatürde orta seviyede σ 'nin çoğu uygulama için optimum olduğu, aşırı yüksek veya düşük σ 'nin ise performansı olumsuz etkilediği gösterilmiştir. Doğal lif kaynaklı panellerde akış direnci liflerin dolgu yoğunluğu, sıkıştırma, lif biçimlenmesi ve yüzey topolojisi tarafından belirlenir. Dolayısıyla morfolojik veriler akış direncinin anlaşılmasında doğrudan anahtar rol oynar [Abdul Aziz&Kamarul, 2021].

2.4. Morfoloji-Akustik İlişisini Açıklayan Kuramsal Modeller

Poröz malzemeler için kullanılan yaygın modeller (Delany-Bazley, Johnson-Champoux-Allard – JCA, Zwicker-Kosten) temel olarak; akış direnci, porozite ve tortuozite gibi parametreleri kullanır. Ancak bu modeller çoğunlukla daha düzenli sentetik veya tek ölçekli doğal lifli yapılar için kalibre edilmiştir. Kaz tüyleri hiyerarşik bir yapıya sahiptir. Bu tarz hiyerarşik yapıya sahip malzemelerin doğru bir şekilde temsil edilebilmesi

için model parametrelerine yapının lümen hacmi, barbules yoğunluğu, yüzey pürüzlülüğü gibi morfolojik ölçülerin girilmesi veya bu modellerin genişletilmesi gerekmektedir. Böylece hem teorik çalışmalar hem de son yıllardaki uygulamalı çalışmalar bahsediliği üzere model-deney bağlantısını kurmaya odaklanmıştır [Moncayo ve ark.,2024].

2.5. Gözenek Geometrisi, Kanal Yapıları ve Rezonans Etkileri

Gözeneklerin boyutu ve şekli (küresel boşluk, boru/kanal tipi, kapalı odaçıklar) rezonans-türü mekanizmalar oluşturabilir. Örneğin küçük bir boşluk + dar bir boğaz (Helmholtz tipi davranış) belirli frekansta yerel enerji zayıflaması sağlayabilir. Kaz tüyünün sap (calamus) içi boş kanal yapıları ve plumul-barbule hiyerarşisi bu tür mikro-Helmholtz benzeri veya kanal rezonanslarını tetikleyebilir. Bu nedenle SEM’de gözlenen iç boşluk geometrisinin rezonans katkısını tartışmak anlamlıdır. Literatürde atık tüylerden üretilen hava-laid matların 250–800 Hz aralığında iyi performans gösterdiği raporlanmıştır. Bu, yapısal rezonans ve çoklu saçılmanın ortak etkisine işaret eder [Dieckmann, 2018].

2.6. Lif Sertliği, Yoğunluk ve Akustik Empedans Geçiş

Malzeme içinde sert (sap/ calamus) ile yumuşak (plumule/barbule) bölgelerin varlığı bir empedans geçişi yaratır. Bu tür geçişler düşük frekansta yansımayı/iletimi etkiler ve malzemenin ses iletim kaybı (transmission loss: TL) davranışına katkıda bulunabilir. Bu açıdan kaz tüyü, hem düşük yoğunluklu (hafif) hem de yerel olarak sert yapılar içerdiği için, klasik tek özellikli lif yapılarında farklı bir TL profili verebilir. Bu tür heterojen yapıların akustik etkileri, son dönemde yapılan doğal atık tabanlı yalıtım çalışmaları tartışılmaktadır. [Dieckmann, 2018].

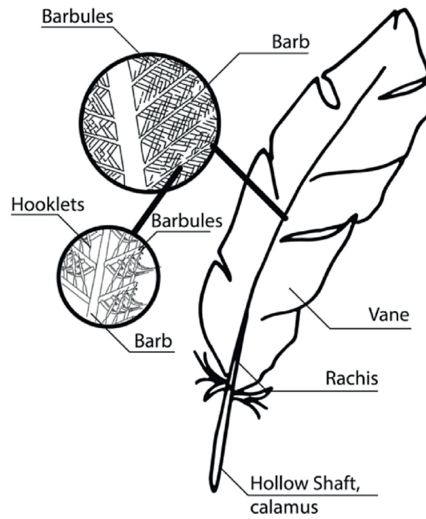
3. Kaz Tüylerinin Morfolojik Özelliklerinin İncelenmesi Ve Akustik Performans Özellikleri

Hayvansal tüylerin sahip oldukları bir takım benzersiz özellikler, onları yeniden yüksek performanslı malzemelere dönüştürme konusunda olarak sağlamaktadır. Tüyler ağırlıklı olarak keratinden oluşurlar ve Şekil 1’de gösterildiği üzere, içi boş bir gövde(rachis) ve tüy ekseninden oluşan karmaşık bir yapıya sahiptirler. Tüyler, diken ve tüycük adını verdiğimiz yapıdan meydana gelmektedir [Schelestow ve ark., 2017]. Nihayetinde tüyler yüksek çekme mukavemet ve tokluk özelliği ile beraber son derece hafif ve mükemmel ısı yalıtım özelliğine sahip olan materyallerdir. Tüylerin ayrıca göve ve dikenli yapıları ses dalgalarını emerek çok etkili bir şekilde

dağıtarak ses iletimini engellemesi nedeniyle sıradışı bir akustik özelliğe sahip olduğu bilinmektedir [Chen ve ark., 2017].

Hafif ses emici malzemeler, havacılık ve otomotiv uygulamalarında, ses iletiminin sorun olduğu bazı özel sivil altyapı geliştirmelerinde ve binalarda önemli bir yere sahiptir [Asdrubali ve ark., 2016].

Köpük yapı malzemelerinin normalde ses emiliminde yaygın kullanılması yine de alternatif açıdan daha sürdürülebilir malzemelerin geliştirilmesine olan ihtiyacın önünü kapatmamaktadır. Literatürde bakıldığında doğal ve geri dönüştürülmüş akustik malzemelerin üretimine dair çalışmalar bulunmaktadır fakat tüylerle ilgili olan çalışmalar sınırlı sayıdadır. Tüylerle ilgili yapılan çalışmalar incelediğinde ise bu çalışmaların büyük oranda tavuk tüyleri kullanılarak yapıldığı görülmektedir. Kaz tüylerinin ses yalıtım malzemesi olarak kullanılmasına yönelik detaylı bir çalışmaya rastlanmamıştır.

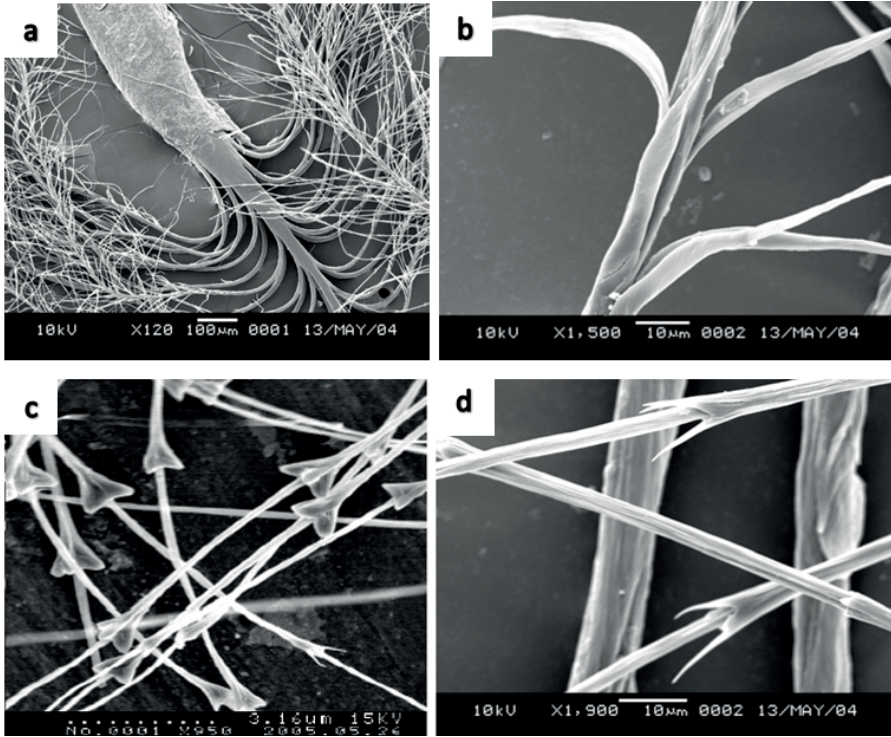


Şekil 1. Tüyün yapısı [Schelestow, 2017].

Kaz tüyleri hafiflik, yüksek hapsolmuş hava hacmi, doğal porozite ve kompleks lif mimarisi sayesinde ısı yalıtımında uzun süredir tercih edilmektedir. Fakat bu tüylerin morfolojik özelliklerinin ses yutumu üzerindeki potansiyel etkileri üzerinde az sayıda çalışma olduğu bilinmektedir. Bu nedenle, kaz tüylerinin çok katmanlı mikroyapısının ses yutum mekanizmasına olan katkılarını anlamak, doğal lif esası üretilen sürdürülebilir ses yalıtım malzemelerinin tasarımı açısından önem taşımaktadır [Kang ve ark., 2021; Zulkifli ve ark., 2020].

Kaz tüylerinin karmaşık morfolojik yapısı ısı yalıtımında üstün performans göstermektedir. Literatür incelendiğinde bu konudaki en kapsamlı SEM temelli yapılan çalışmalardan birisi Gao, Yu ve Pan (2007) tarafından gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışma kaz tüylerinin ısı yalıtım mekanizmasını açıklayabilmek için hem morfolojik hem de fiziksel ve kimyasal özelliklerinin detaylı incelendiği kapsamlı bir araştırma olduğunu göstermektedir.

Gao'nun çalışmasındaki kaz tüylerinin SEM analizinde, tüylerin hiyerarşik olarak dallanmış bir yapıda olduğu gösterilmektedir. Bir kaz tüyü dalı, kısa bir merkezi gövdeden farklı açılarla ayrılan çok sayıdaki alt dallar ve bunların üzerinde yer alan yüzlerce ince fibrilden oluşmaktadır. Araştırmada fibril çaplarının yaklaşık 2–6 μm , alt dalların ise 8–20 μm aralığında olduğu; fibril uçlarında ise düzenli aralıklarla yerleşen düğüm (node) ve çatallanma (crotch) benzeri özel morfolojik unsurlar bulunduğu belirtilmiştir [Gao ve ark., 2007]. Bu düğümlerin ve çatallanma noktalarının, sıkıştırma altında bile yüksek geri kazanım sağlayan üç boyutlu bir iskelet oluşturduğu belirtilmiştir. Bununla birlikte, Gao'nun SEM incelemeleri büyük ölçüde liflerin enine kesitine ve makro düzeydeki yapısal bütünlüğüne odaklanmıştır. Bu nedenle, akustik davranışla doğrudan ilişkili olan mikro-gözeneklilik, iç boşluk yapıları ve tortuozite gibi parametreler çalışma içerisinde net olarak ortaya çıkmamaktadır. Özellikle, SEM görüntülerinde makrofibrillerin oldukça kompakt ve gözeneksiz bir düzen içinde olduğu vurgulanmıştır. Bu durum ısı yalıtımı açısından avantajlı olmakla birlikte, akustik sönümleme açısından yorumlanabilir nitelikte boşluk bilgisi sunmamaktadır [Gao, 2002]. Bu nokta, kaz tüylerinin akustik uygulamalar açısından yeniden değerlendirilmesi için literatürde önemli bir boşluğun olduğunu ortaya koymaktadır. Çünkü akustik soğurma mekanizması, ısı yalıtımından farklı olarak, ses dalgalarının lifler arasındaki bağlantılı gözenek ağında sürtünmeye uğraması ve visko-termal kayıpların oluşmasıyla ilişkilidir; dolayısıyla lif yüzeyi, fibril düzeni ve özellikle mikro ölçekli porozite akustik performansı belirleyen temel unsurlardır.



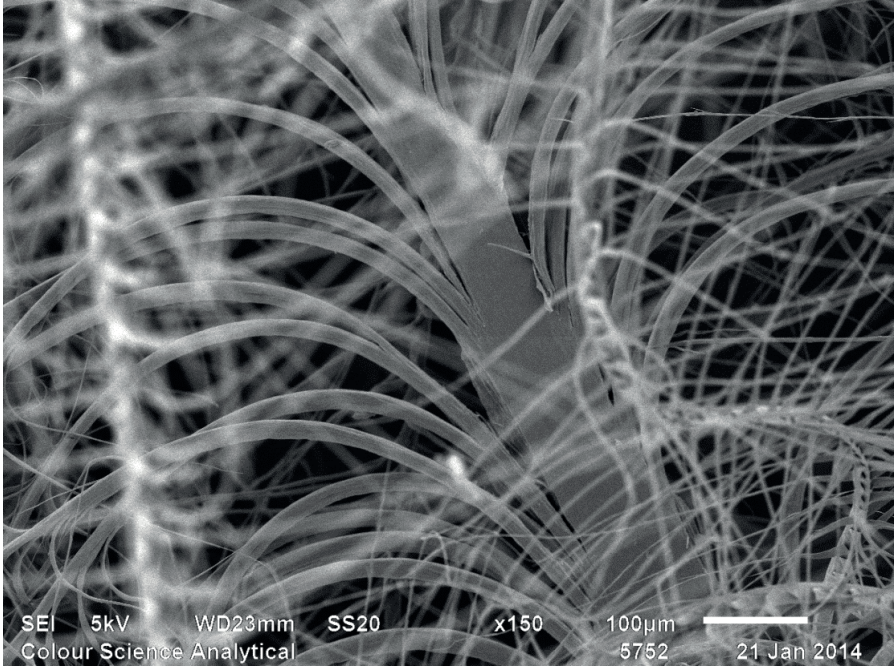
Şekil 2. *Bireysel dallanmış tüy, alt dallar; üçgen ve dallanmış bölge, fibriller üzerindeki düğümler.*

Kaz tüyü temelde merkezde sap dediğimiz rachis (ana sap) ve ondan çıkan ve dallanmış vaziyette bulunan çok sayıda barb (dallanmış lifler) ile bu barblar üzerinde yer alan barbuleslerden meydana gelmektedir. Fuller (2015) tarafından yapılan ölçümlere göre, kaz tüyü barbları ortalama 15–20 mm uzunluğundadır ve eider tüyü barblarına kıyasla daha kısadır. Barblar esnek yapıları sayesinde büyük açılarda bükülebilir; barbules yapısı sayesinde ise kırılırlar bir tamamen birbirinden ayrılmazlar. Bu da yapının bütünlüğünün korunmasını sağlar.

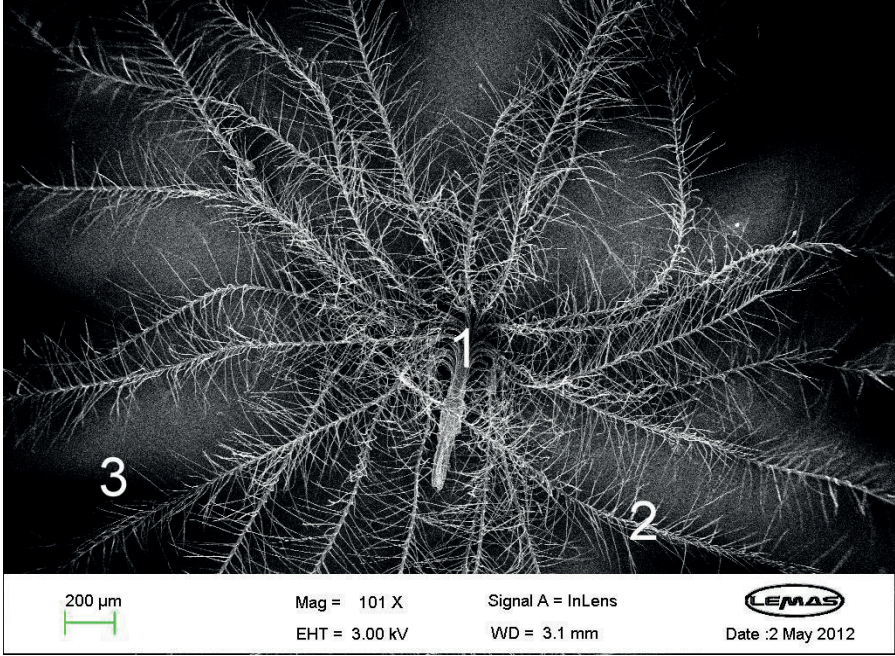
Kaz tüyleri, üzerine uygulanan bir yüke rağmen sıkıştırmaya karşı oldukça yüksek direnç göstermektedirler. Bu nedenle geri yayılım kapasitesi (rezilyans) yüksek bir malzemedir. Bu durum tüyün hacimsel anlamda doluluğunu (loft) korumasına ve uzun süreli kullanımlarda yüksek performans göstermesine olanak sağlar. Kaz tüyü üzerinde yapılan mekanik testlerde kaz tüyü barb yapılarının orta seviyede Young modülü ve maksimum çekme dayanımına sahip olduğunu ve aynı zamanda liflerin yüksek deformasyona karşı tolerans gösterdiği görülmektedir. Sahip olduğu bu özellik kaz tüylerini uzun

ömürlü ve aynı zamanda dayanıklı doğal bir yalıtım malzemesi olarak sunmaktadır. Liflerin sahip olduğu elastik yapı, sıcaklık değişimleri ve yük altında sıkıştırma durumlarında yapının bütünselliğini korumaya yardımcı olur.

Tüm bu özellikleriyle kaz tüyü, dış giyim, uyku tulumları ve yüksek performanslı izolasyon ürünlerinde tercih edilen doğal bir malzeme olarak öne çıkar [Fuller, 2015] Şekil 3'te ve Şekil 4'te kaz tüyünün SEM görüntüsü; barblar ve barbullerin mikro yapısını gösterilmektedir.



Şekil 3. Kaz tüyünün uç kısmından merkezinden alınan barbs kısmının SEM görüntüsü [Fuller, M. E., 2015].



Şekil 4. Kaz tüyü demetinin ana özelliklerini tanımlayan SEM: 1 – tüy çekirdeği; 2 – tüy ucu; 3 – tüyçük [Fuller, M. E., 2015].

SEM ve mikroskopik incelemeler, kaz tüyünün barblar ve barbuller gibi mikro yapılarının ayrıntılarını ortaya koyar. Bu yapısal özellikler, tüyün mekanik ve fonksiyonel performansının temelini oluşturur.

3.1. Kaz Tüyünün Çok Katmanlı Mikroyapısının İncelenmesi

Yapılan bu çalışmada kullanılan tüyler Nevşehir'in Göreme ilçesinden temin edilmiş olup, 30°C sıcaklıkta, 30 dk süre ile kimyasal kullanılmadan musluk suyu ile çamaşır makinesinde pamuklu bir yıkama çantası içinde yıkanmış ve normal atmosfer şartlarında 24 saat süre ile kurutulmaya bırakılmıştır [Şekil 5].



Şekil 5. Yıkılmış kaz tüyü.

Yukarı verilen kaz tüylerinin baş (distal tip), orta (barb bölgesi) ve sap/kök (rachis) adı verilen bölgelerden elde edilen SEM görüntüleri değerlendirilerek, liflerin morfolojisinin akustikte önem taşıyan porozite, akustik akış direnci, ses dalgasının saçılması, iç sürtünme kayıpları gibi temel parametrelerle olan ilişkisi değerlendirilecektir.

Kaz tüyü temelde üç esas bölgeye oluşmaktadır:

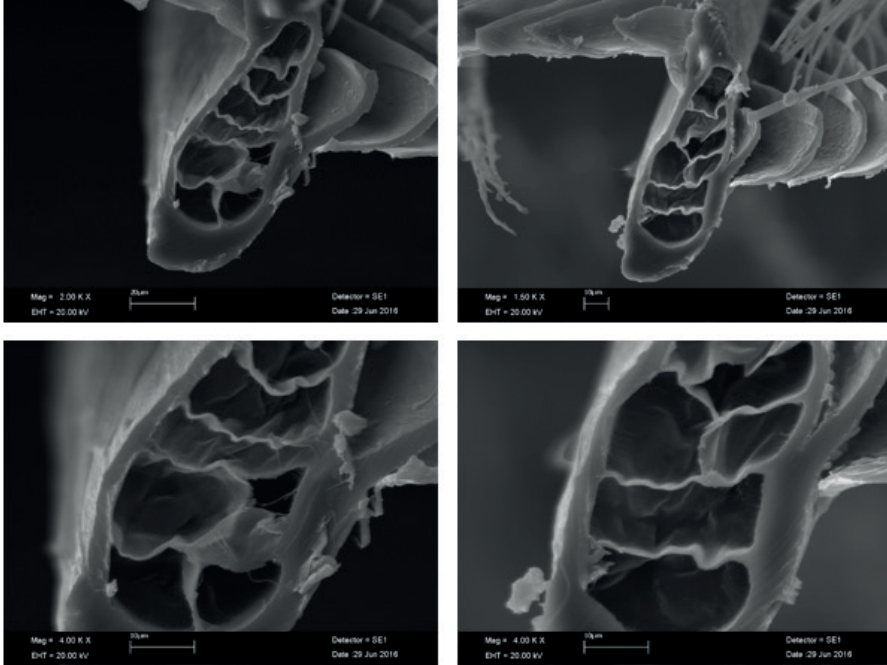
1. Distal uç (tip): Bu kısım yüksek düzeyde mikro dereceli lif içerir. İnce barbüllerin meydana getirdiği düzensiz şekilde yerleşmiş yapılardan oluşur.
2. Barb bölgesi (orta kısım): Bu kısım distal uca göre daha kalın liflerden meydana gelmektedir. Ayrıca etrafa yayılan yan lif ağları ile çevrilidir.
3. Rachis (sap/kök): Bu bölge gözeneklik bakımından en düşük olan alandır. Bölgenin sertlik derecesi çok yüksektir. Aynı zamanda lif açılımının minimum olduğu bölgedir.

Yukarıda sıralandığı üzere kaz tüylerinin sahip olduğu bu anatomik çeşitlilik, aynı tüy içinde bile olsa farklı frekanslardaki sesleri farklı mekanizmalarla yutabilecek heterojen bir yapı ortaya koymaktadır [Wang et al., 2021].

3.2. Numunelerin SEM Analizi ve Akustik Açısından Yorumu

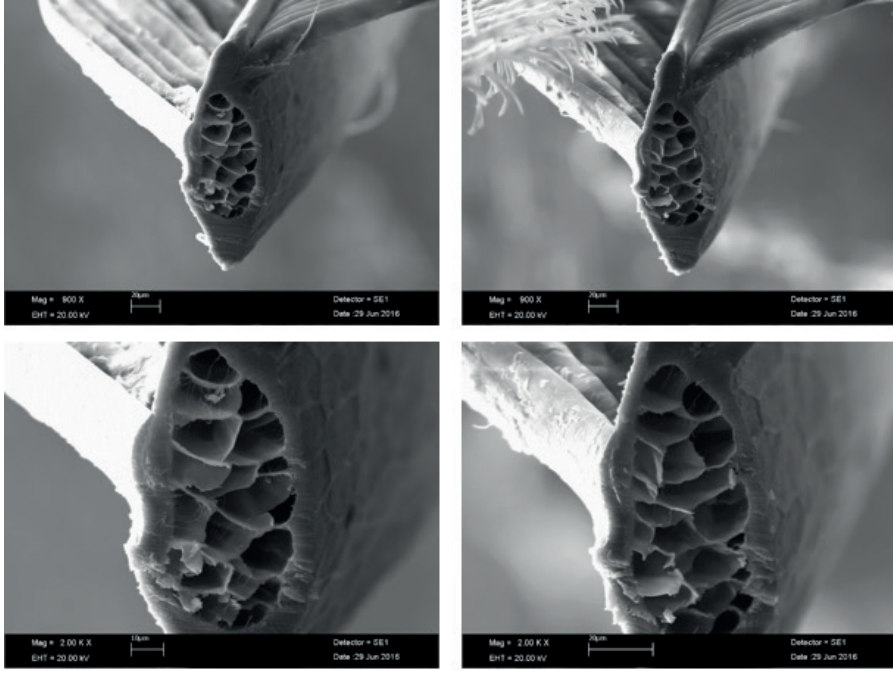
Yapılan SEM analizleri kaz tüylerinin her bir bölgesini mikromorfolojik anlamda detaylı olarak değerlendirmeye olanak tanıyacaktı. Bu nedenle tüyün baş, orta ve uç kısmından elde edilen liflerin enine kesit görüntüleri incelenmiştir. Aşağıda sırasıyla bu görüntüler verilmiştir.

Şekil 6'da kaz tüylerinin kök kısmından alınan numunenin SEM görüntüsü verilmiştir. Şekil 6'da farklı açılardan elde edilmiş SEM görüntüsünde, tüylerin ince barbüllere ve dallanmış mikro lif ağına sahip olduğu görülmektedir. Bu görüntü, yapıya yüksek yüzey alanı ve yüksek boşluklu düzensiz bir porozite kazandırır ki; bu durumda liften elde edilecek yapıların yüksek derecede ses emilimi yapabileceğine işaret etmektedir. Bu yapı, özellikle orta ve yüksek frekanslarda (1000-5000 Hz) sesin çoklu saçılmalarla yönünün değiştirip enerji kaybetmesine neden olabilir. Bu liflerden üretilecek olan akustik malzemelerde lifin yüksek mikro porozite yapısına sahip olması iç sürtünmeden kaynaklı daha fazla viskoz kayıp olacağına anlamına gelir. Düzensiz şekilde liflerin yönlendirilmesi ise sesin saçılmasına neden olur. Lif aralıklarının geniş dağılımı ise ses frekans bandını genişletir ki bu durum malzemenin kullanım alanını artırır.



Şekil 6. Kaz tüylerinin kök kısmından alınan numunenin SEM görüntüsü.

Şekil 7’de kaz tüylerinin orta kısmından (barb bölgesi) alınan numunenin SEM görüntüsü verilmiştir.



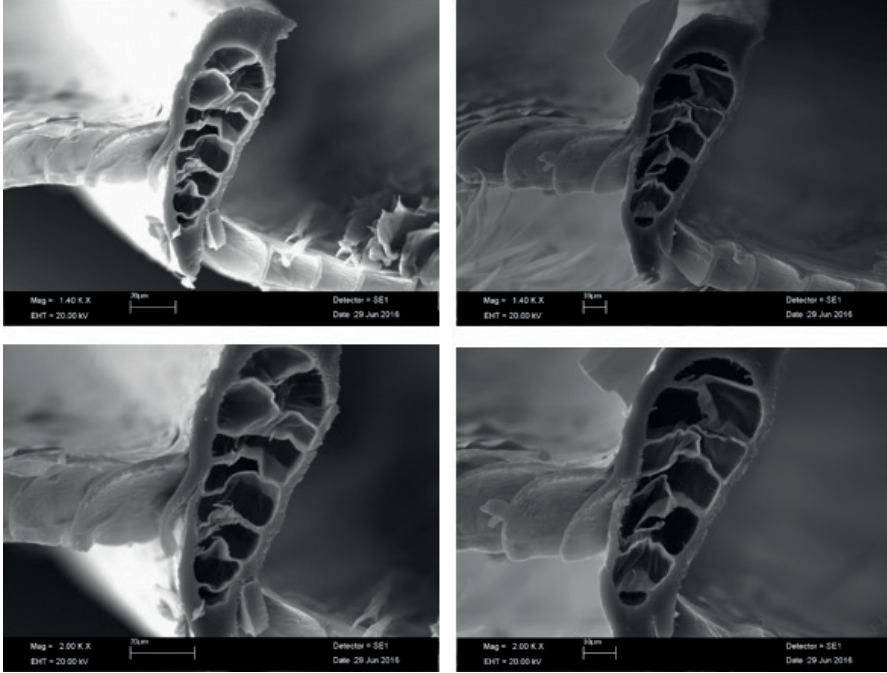
Şekil 7. Kaz tüylerinin orta kısmından alınan numunenin SEM görüntüsü.

Şekil 7’de incelenen lifte, ana liflerin arasında köprülenen yan barbüllerin olduğu görülmektedir. Benzer yapı tavuk tüylerinde de vardır. Bu konuda literatür çalışmalarına bakıldığında detaylı bir çalışma bulunmaktadır [Kocatepe, 2019]. Dallanmış yapıda belirginleşen bir düzen fark edilmektedir. Orta ölçekli bir porozitenin olduğu ve lif yüzeylerinde ise mikro pürüzlerin olduğunu açıkça fark edilmektedir.

Şekil 7’de SEM görüntüsü alınan numune, tüyün en karmaşık ve akustik bakımdan en işlevsel kısmıdır denilebilir. Porozite dağılımı orta frekanslarda (500-1500 Hz) ses yutumuna uygun bir direnç sunabilir. Ayrıca lifin yüzey pürüzlülüğü lif ile hava arasındaki sürtünme kayıplarını artırarak akış direncini optimum hale getirir.

Şekil 8’de SEM görüntüsü alınan yapı incelendiğinde sert ve kompakt rachis yapısına sahip olduğu görülmektedir. Düşük porozite ve kalın hücresel duvarların varlığı açıkça görülmektedir. Lifin bu bölgesinde ses yutumundan çok ses enerjisinin kısmen engellenebileceği bundan dolayı

da sesin yansıtılabileceği düşünülebilir. Dolayısıyla kaz tüyü esas ses yutum davranışını orta ve uç bölgelerde sahip olduğu yüksek gözenekli alanlar yardımıyla gösterecektir. Yapıdaki gözeneklerin orta ve uç bölgedeki gözeneklere oranla çok iyi olmaması, sesin düşük frekans alanlarında (100-400 Hz) sınırlı etki gösterebileceğini düşündürmektedir. Belki çok katmanlı kompozit yapılarda arka katman olarak kullanılması durumunda tasarlanan malzemenin ses yutumuna katkı sunabilir.



Şekil 8. Kaz tüylerinin baş(uç) kısmından alınan numunenin SEM görüntüsü

Bu çalışmada kaz tüylerinin baş, orta ve kök bölgelerinden elde edilen yüksek çözünürlüklü SEM görüntüleri, Gao'nun ısı odaklı çalışmasından farklı olarak, liflerin akustik davranışa etki eden doğal gözenek kanallarını, hiyerarşik lif ayrışmasını, fibril açıklıklarını ve bağlantılı boşluk sistemini ayrıntılı biçimde ortaya koymaktadır. Çalışma bu yönüyle literatürde bulunan ısı yalıtımla alakalı yapılan önceki çalışmaların bıraktığı boşluğu tamamlayan yeni bir bakış açısı sunmaktadır.

Dolayısıyla Gao'nun çalışması, kaz tüylerinin hiyerarşik morfolojisini anlamak açısından temel bir referans olmasına rağmen, akustik performansla ilişkili mikro-gözenek yapısını açıklamak için yeterli değildir. Bu sebeple, aşağıda verilmiş olan özgüm SEM analizi sonuçları kaz tüylerinin akustik

açından ses yutum potansiyelini doğru şekilde değerlendirmek bakımından gereklidir ve bilimsel çalışmalar açısından literature önemli düzeyde bir katkı sunacağı düşünülmektedir.

4. Kaz Tüylerinin Akustik Malzemelerde Kullanım Potansiyeli

Yapılan literatür çalışmaları incelendiğinde kaz tüyleri kronolojik olarak ısı yalıtımı alanında kullanılmış doğal protein esaslı bir biyomalzeme olmasına rağmen, gözenekli yapıları ve hiyerarşik lif yapısına sahip olması bakımından akustik sektöründeki çeşitli uygulamalarda dikkat çeken bir malzeme haline gelmiştir. Bu bölümde kaz tüylerinin akustik olarak davranışı doğal liflerin ses yutum prensiplerine dayanarak ilişkilendirilecek ve akustik performansın hangi yapısal mekanizmalardan kaynaklanabileceği detaylı bir şekilde tartışılacaktır. Ayrıca elde edilen analiz sonucuna göre kaz tüylerinin yenilikçi akustik malzemelerde kullanımına yönelik bir tasarım modeli önerilerek ve bu alanda yapılacak olan çalışmalara ışık tutması planlanmaktadır.

4.1. Doğal Liflerin Akustik Davranışlarının İncelenmesi

Lif morfolojisi, gözeneklilik, lif çapı, tortuosity, lif-matris arayüzü, lif akış direnci gibi pek çok parametre doğal lifli malzemelerin akustik performansını direk etkilemektedir. Gözenekli malzemelerde ses enerjisinin yutulması, esas olarak viskoz ve termal kayıplar ile gözenek içerisindeki sıkışma–genişleme döngüleri yoluyla gerçekleşir [Allard&Atalla, 2009; Cox&D’Antonio, 2017]. Homojen olmayan gözenek yapıları, dallanmış biçimdeki lif morfolojisi ve yüksek yüzey alanlarından dolayı doğal lifler pek çok sentetik life göre farklı bir akustik mekanizma sunmaktadır.

Özellikle jüt, pirinç, hindistan cevizi (coco), kenaf, yün ve pamuk gibi doğal liflerde dallanmış ve içi boş olan yapılar, orta ve yüksek frekanslarda ses yutum performansını iyileştirirler. Lifin boşluklu iç yapısı, geniş gözeneklerin hacmi sayesinde düşük frekanslı ses dalgalarının sönümlenmesine katkı sağlarlar. Yüzey pürüzlülüğü üse sürtünme katsayısını artırdığından dolayı, yapının yüksek frekanslarda viskoz kayıpları yükselir. Tüm bu bulgular, kaz tüylerinin yapısal olarak sahip olduğu hiyerarşik dallanmadan ötürü ses yutum mekanizmalarında diğer malzemeler gibi benzer bir performans sergileyeceğini ortaya koymaktadır.

4.2. Kaz Tüylerinin Morfolojisi Açısından Akustik Değerlendirme

SEM analizleri kaz tüyünün temelde üç bölgeden meydana geldiğini göstermektedir: distal uç, bar/barbules bölgesi ve ana omurgasını oluşturan

rachis (sap) bölgesi. Bu bölgeler gözenek boyutu, lif inceliği ve hiyerarşik dallanma düzeyi bakımından yüksek oranda farklılıklar göstermektedir.

Distal Uç Bölgesi: Mikro-Kapiller ve Yüksek Frekans Sönümü: Distal uçta görülen barbule yapıları, 10–30 μm arasındaki mikro kanallar ve yüksek pürüzlülük düzeyiyle karakterizedir (Şekil 2). Bu bölge yüksek frekanslara çıkıldığında baskın olan viskoz sürtünme kayıplarından dolayı akustik bakımdan önemlidir. Delany–Bazley modeline göre gözenek çapı küçüldükçe viskoz sınır tabakası kalınlığı göreceli olarak büyür ve ses enerjisi daha yoğun biçimde sönümlenir [Delany&Bazley, 1970]. Bu nedenle ≥ 1500 Hz frekans aralığında yapının yüksek ses yutma performansı göstermesi beklenmektedir.

Barb ve Barbules Bölgesi: Gözenekli Yapı ve Orta Frekans Ses Yutumu: Barbule yapısı incelendiğinde yapıda daha büyük boşlukların olduğu ve genel anlamda düzensiz şekilde odacıklardan meydana geldiği görülmektedir. Bu da yapının karmaşık bir tortuosity değeri sunacağını ortaya koyar (Şekil 4). Bu yapı, orta frekanslarda (500–2000 Hz) ses yutma için ideal kabul edilebilir. Mikrogözeneklerin içindeki çoklu yansımalar ve yön değişimleri ses dalgalarının fazında gecikmeye ve bu sayede de enerji kayıplarının yaşanmasına yol açar. Bu nedenle ses yutumunda lifin orta bölgesinin orta frekansta etkin rol oynayacağını düşündürmektedir.

Rachis (Sap) Bölgesi: Makro Gözenekler ve Düşük Frekans Ses Davranışı: Kaz tüyünün merkez gövdesi olan sapı (rachis), iç boşuklu geniş yapısı ile adeta tüp benzeri bir yapıyı andırır (Şekil 7). Bu hacimsel gözenek, düşük frekanslı dalgaların sıkışma–genişleme döngüsüne olanak tanıdığından bir tür Helmholtz benzeri rezonans hapsi yaratır [Yang ve ark., 2020]. Cox ve D’Antonio (2017) geniş iç boşuklu doğal tüplerin 100–500 Hz aralığında düşük frekans performansını artırdığını bildirmiştir. Bu nedenle rachis bölgesinden alınan görüntüde yapının düşük frekansta ses yutumuna katkı sunacağı yapılan bilimsel çalışmalarla örtüşmektedir [Paşayev ve ark., 2018].

5. Tartışma ve Değerlendirme

Bu çalışmada anatomik olarak 3 farklı bölgesinden (distal uç, barb/ barbule, rachis) görüntü alınan kaz tüyleri, doğal lifli akustik yalıtım malzemelerinde gözlenen temel ses yutum mekanizmalarıyla birlikte değerlendirilmiş ve bu tüylerin akustik amaçlı kullanımına yönelik mevcut potansiyel değerlendirilmiştir. Çalışmanın temel amacı, mikrogözenekli bir iç yapıya sahip olan kaz tüylerinin literatürdeki diğer doğal lif esaslı olan çalışmalardan nasıl ayrıldığını, SEM görüntülerinden elde edilen bulguların hangi akustik sonuçlarına işaret ettiğini ve gelecekte kaz tüylerinin akustik

bir malzemede uygulanabilirliğine dair temel bir çalışma ortaya koymaktır [Allard & Atalla, 2009].

Akustik açıdan değerlendirildiğinde kaz tüyünün morfolojik yapısı, hiyerarşik bir biçimde sunduğu gözeneklilikten ötürü üç boyutlu ve çok katmanlı bir yapının ortaya çıkmasını sağlamaktadır. Literatürde bulunan akustik yalıtım malzemeleri incelendiğinde doğal liflerin ses yutum performansının temelde lifin çapı, yüzey pürüzlülüğü, gözeneklerin boyutu ve dağılımı, tortuosity ile ilişkide olduğu görülmektedir. Kaz tüyünü diğer doğal liflerden ayıran en temel özellik ise aynı lif üzerinde bölgesel olarak değişen morfolojik bir yapıya sahip olmasıdır. Bu da malzemeyi eşsiz bir biyomalzeme kılar. Bu durum kenaf, jüt, yün ve kenevir gibi tek ölçekli lif yapısına sahip doğal liflerle kıyaslandığında kaz tüyleri geniş bir frekans aralığında enerji sönümleme potansiyeline sahip olan özel bir yapıdır

Kaz tüyünün SEM analizleri incelendiğinde tüyün distal uç bölgesinin çok sayıda ince barbule liflerinden meydana geldiği görülmüştür. Bu bölgedeki lif çaplarının boyutlarının küçük olması (10–30 μm), ince mikro kanallar oluşturması ve yüksek yüzey alanı, yüksek frekanslarda viskoz kayıpların baskın hale geldiği modellerle uyumludur [Delany & Bazley, 1970]. Bu nedenle distal uç bölgesinin, akustik yalıtım malzemelerinde yüksek ses frekans bandının absorpsiyonu bakımından kritik bir katman görevi gördüğü düşünülebilir. Bu sonuç, yün ve pamuk gibi mikro liflerden oluşan yapılarda yüksek frekans absorpsiyonunu arttırdığını ortaya koyan çalışmalarla paraleldir.

Kaz tüyünde barb ve barbule bölgesi, SEM görüntüleri dikkatli incelendiğinde çok odacıklı ve bağlantılı gözenek yapılarıyla dikkat çekmektedir. Bu durum orta frekanslarda ses dalgalarının çoklu yansımaları nedeniyle, sesin enerji kaybetmesine neden olan mekanizmalarla benzerdir. Doğal liflerde orta frekansta ses yutumunun en belirgin göstergesi yüksek tortuosity değeridir. Barbule bölgesi bu yapıyı oluşturur. Bu bulgu, jüt ve kenaf liflerinin orta frekans aralığında yüksek performans göstermesinin arkasındaki mekanizmayla da benzer sonuçlar göstermektedir. Kaz tüyü morfolojisinin bu bölümü, konvansiyonel dokusuz yapılara kıyasla daha karmaşık ve düzensiz bir geometri sunarak özellikle 500–2000 Hz frekans aralığında etkili bir sönümlemenin yapılabileceğine işaret etmektedir.

Sap kısmını oluşturan rachis bölgesi ise içi boş makro ölçekli bir tüy yapısı göstermektedir. Literatürde geniş iç boşluklu doğal tüplerin düşük frekanslarda rezonans tabanlı absorpsiyona katkı sunduğu bilinmektedir [Cox&D'Antonio, 2017; Yang ve ark., 2020]. Kaz tüyünün bu bölgesi literatürdeki diğer doğal liflerle kıyaslandığında, bu liflerde bulunmayan yapısal bir avantaj sağlar. Çünkü kaz tüyünün makro ölçekli gözenekli hacmi,

düşük frekanslı ses dalgaları için sıkışma-genişleme odası görevi görerek bu sayede enerji kaybına katkı sağlar. Bu durum, kaz tüyü esaslı akustik yalıtım malzemelerinde düşük ses frekans performansının artırılmasına yönelik farklı tasarım olanakları sunar.

Bununla beraber kaz tüylerinin akustik performansının test edilmesi üzerine az sayıda deneysel çalışmanın bulunması bu alanda önemli bir araştırma boşluğunun olduğunu göstermektedir. SEM bulguları bu tüylerin potansiyel anlamda farklı frekans aralıklarında etkin bir performans gösterebileceğini ortaya koymaktadır. Fakat akustik performansın pratikte doğrulanması için normal ses yutum katsayısı, akış direnci testleri, FEM modellemeler ve çok katmanlı kompozit yapılarda kullanımında yapıların deneysel analizlerinin yapılması gerekmektedir. Bu eksiklik, kaz tüylerinin akustik yalıtımda yeterince detaylı şekilde araştırılmamış olmasına rağmen, yenilikçi ve sürdürülebilir akustik malzemelerin geliştirilme çalışmaları için gelecekte büyük bir fırsat sunmaktadır.

Ayrıca kaz tüylerinin düşük yoğunlukta olması, yüksek sıkıştırılabilir özelliği, biyobozunur özelliği ve kimyasal işlenebilirliği bu malzemeleri iğneleme veya termal bağlama metodları ile hibrit kompozit malzemelere entegre ederek, onları akustik malzeme tasarımlarında çok cazip bir malzeme haline getirebilir. Bu çalışma, kaz tüyünün morfolojik yapısını çok boyutlu olarak akustik mekanizmalarla ilişkilendirerek, literature kapsamlı bir teorik bakış sunmaktadır. Böylece kaz tüylerinin sadece ısı yalıtımında değil, aynı zamanda geniş ses frekans bandında akustik soğurucu malzemelerde de etkin şekilde kullanılabileceğini ortaya koymaktadır.

6. Sonuç ve Öneriler

Bu çalışmada kaz tüylerinin morfolojik yapısını SEM analizleri ile ayrıntılı şekilde değerlendirilmiş ve yapısal özelliklerin akustik performansa olan olası etkilileri mevcut literatür bilgileri ile tartışılarak, kaz tüylerinin gelecekte sürdürülebilir bir akustik malzeme olarak kullanılabilme potansiyelini detaylı bir şekilde ortaya koymuştur. Son yıllarda doğal lifler üzerine yapılan mevcut çalışmalar, malzeme gözenekliliği, lif çapı, çok ölçekli porozite, tortuosity ve akış direncinin ses yutum davranışı üzerinde etkin belirleyici parametreler olduğunu göstermektedir. Bu bulgular, kaz tüyünün kompleks ve hiyerarşik yapısının sadece ısı yalıtım sektöründe değil, aynı zamanda akustik yalıtım malzemelerinde de potansiyeli yüksek bir malzeme olabileceğini göstermiştir.

SEM analizleri üç temel bölgeye sahip olan kaz tüylerinin farklı ses frekans aralıklarında etkin şekilde tamamlayıcı bir akustik mekanizmaya sahip olduğunu işaret etmiştir. Distal uç, mikro çaplı barbule lifleri ve

viskos kayıplarının yüksek olduğu ve yüksek frekanslarda etkin olabilecek bir mikro yapısal etki sunar. Barb-barbule bölgesi çok odacıklı ve düzensiz gözenekli yapısı ile, orta frekanslarda ses dalgalarının çoklu saçılma ve yön değiştirme etkisi sayesinde enerji kaybetmesine olanak sağlar. Sap kısmı olan rachis bölgesinin ise düşük frekanslı dalgaların sıkışma-genleşme etkileri ile rezonans tabanlı sönümlenmesine destek veren gözeneklilik sunar. Kritik üç bölgenin birleşimi, kaz tüyünü geniş ses bandında doğal bir ses yutucu malzeme olarak eşsiz bir malzeme haline getirebilir.

Genel anlamda bu çalışmada sunulan SEM analizleri ile literatür bilgisi bir araya getirildiğinde, hafif, çok ölçekli gözeneklilik, biyobozunurluk ve morfolojik çeşitlilik gibi özelliklere sahip olan kaz tüylerinin çevre dostu, yenilikçi ve performans odaklı akustik malzemeler arasında önemli bir aday olabileceği görülmektedir. Bu çalışma, kaz tüyü esaslı ses yalıtım malzemelerinin geliştirilmesine yönelik temel bilimsel bir çerçeve oluşturup, gelecekte bu alanda gerçekleştirilecek olan çalışmalar içinde bir referans niteliği taşımaktadır.

Kaynaklar

- Abdul Aziz, M. A., & Mohd Sari, K. A. (2021). Comparison of sound absorption coefficient for natural fiber. *Progress in Engineering Application and Technology*, 2(1), 157–163. <https://doi.org/10.30880/peat.2021.02.01.15>
- Allard, J. F., & Atalla, N. (2009). *Propagation of sound in porous media: Modelling sound absorbing materials*. Wiley. <https://doi.org/10.1002/9780470747339>
- Arenas, J. P., del Rey, R., Alba, J., & Oltra, R. (2020). Sound-absorption properties of materials made of esparto grass fibers. *Sustainability*, 12(14), 5533. <https://doi.org/10.3390/su12145533>
- Asdrubali, F., Bianchi, F., Cotana, F., D'Alessandro, F., Pertosa, M., Pisello, A. L., & Schiavoni, S. (2016). Experimental thermo-acoustic characterization of innovative common reed bio-based panels for building envelope. *Building and Environment*, 102, 217–229.
- Bravo-Moncayo, L., Argotti-Gómez, M., Jara, O., Puyana-Romero, V., Ciaburro, G., & Guerrero, V. H. (2024). Thermo-acoustic properties of four natural fibers, *Musa textilis*, *Furcraea andina*, *Cocos nucifera*, and *Schoenoplectus californicus* for building applications. *Buildings*, 14(8), 2265. <https://doi.org/10.3390/buildings14082265>
- Chen, K., Liu, O., Liao, G., Yang, Y., Ren, L., Yang, H., & Chen, X. (2012). The sound suppression characteristics of wing feather of owl (*Bubo bubo*). *Journal of Bionic Engineering*, 9.
- Cox, T. J., & D'Antonio, P. (2017). *Acoustic absorbers and diffusers: Theory, design and application* (3rd ed.). CRC Press.
- Delany, M. E., & Bazley, E. N. (1970). Acoustical properties of fibrous absorbent materials. *Applied Acoustics*, 3(2), 105–116. [https://doi.org/10.1016/0003-682X\(70\)90031-9](https://doi.org/10.1016/0003-682X(70)90031-9)
- Dieckmann, E., Dance, S., Sheldrick, L., & Cheeseman, C. (2020). Novel sound absorption materials produced from air-laid non-woven feather fibres. *Applied Acoustics*, 170, 107539. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2020.107539>
- Fuller, M. E. (2015). *The structure and properties of down feathers and their use in the outdoor industry* (Doctoral dissertation). University of Leeds. <https://etheses.whiterose.ac.uk/id/eprint/9268>
- Gao, J., Yu, W., & Pan, N. (2007). Structures and properties of the goose down as a material for thermal insulation. *Textile Research Journal*, 77(8), 617–626.
- Kang, C., Lee, J., & Kim, H. (2021). Acoustic characterization of natural fiber-based porous materials. *Applied Acoustics*, 178, 108054.

- Kang, H., Ko, S., & Lee, J. (2021). Sound absorption mechanisms of natural fibers: A review. *Materials Today Sustainability*, 14, 100074.
- Kocatepe, S. (2019). Kuş tüylerinden tekstil amaçlı protein esaslı materyaller üretiminde hazırlık işlemleri, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Kayseri
- Lashgari, M., Taban, E., SheikhMozafari, M. J., Soltani, P., Attenborough, K., & Khavanin, A. (2024). Wood chip sound absorbers: Measurements and models. *Applied Acoustics*, 220, 109963.
- Mohanty, A. K., Vivekanandhan, S., Pin, J. M., & Misra, M. (2021). Composites from renewable and sustainable materials. *Nature Sustainability*, 4(3), 150–160.
- Pashayev, N., Kocatepe, S., & Maraş, N. (2018). Investigation of sound absorption properties of nonwoven webs produced from chicken feather fibers. *Journal of Industrial Textiles*, 48(3), 1–20.
- Schelestow, K., Troncoso, O. P., & Torres, F. G. (2017). Failure of flight feathers under uniaxial compression. *Materials Science and Engineering C*, 78, 923–931.
- Sheikhmozafari, M. J., Alizadeh, P. M., & Ahmadi, O. (2021). Assessment of noise effect on employee comfort in an open-plan office: Validation of an assessment questionnaire. *Journal of Occupational Health and Epidemiology*. <https://doi.org/10.52547/johe.10.3.193>
- Wang, Z., Li, H., & Chen, J. (2022). Micro-porous natural fibers and their acoustic behavior. *Materials Today*, 53, 112–122.
- Yang, T., Hu, L., Xiong, X., Petru, M., Noman, M. T., Mishra, R., & Militký, J. (2020). Sound absorption properties of natural fibers: A review. *Sustainability*, 12(20), 8477. <https://doi.org/10.3390/su12208477>

