

Gökmar, Doğı Kayını ve Afrika Maunu Türlerinin Makro ve Mikro Yapılarının Analizi

Çiğdem ÇİÇEK^{1*} 

¹Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ağaççşleri Endüstri Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Ankara, Türkiye

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 13/08/2025
Düzeltilme: 10/09/2025
Kabul: 15/09/2025

Anahtar Kelimeler

Gökmar
Doğı Kayını
Afrika Maunu
Odun Anatomisi
Mikroskopik Analiz
Damar Çapı
Trakeid
Biyolojik Dayanıklılık

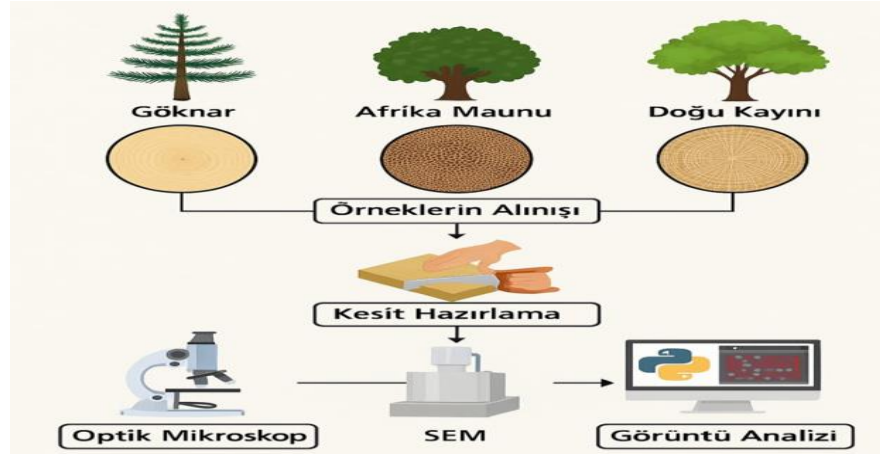
Article Info

Research article
Received: 13/08/2025
Revision: 10/09/2025
Accepted: 15/09/2025

Keywords

Silver Fir
Oriental Beech
African Mahogany
Wood Anatomy
Microscopic Analysis
Vessel Diameter
Tracheid
Biological Durability

Grafik Özet (Graphical Abstract)



Şekil A: Grafik Özet / Figure A: Graphical Abstract

Önemli noktalar (Highlights)

- Gökmar, Doğı Kayını ve Afrika Maunu karşılaştırmalı incelenmiştir. Fir, Oriental Beech, and African Mahogany were comparatively examined.
- Optik mikroskop ve SEM ile detaylı hücresel analiz yapılmıştır. Detailed cellular analysis was conducted using optical microscopy and SEM.
- Hücresel yapı ile endüstriyel kullanım ilişkisi ortaya konmuştur. The relationship between cellular structure and industrial application was revealed.
- Tür seçimine yönelik bilimsel katkı sağlanmıştır. A scientific contribution was provided for species selection.

Amaç (Aim): Bu çalışma, Gökmar, Doğı Kayını ve Afrika Maunu türlerinin makro ve mikroyapılarını karşılaştırmalı olarak incelemeyi ve bu yapıların malzeme performansına etkilerini ortaya koymayı amaçlamaktadır. / This study aims to comparatively investigate the macro- and microstructures of Fir, Oriental Beech, and African Mahogany species and to reveal the effects of these structures on material performance.

Özgünlük (Originality): Çalışma, farklı ekolojik kökene sahip üç odun türünü hem klasik odun anatomisi hem de modern görüntü analizi yöntemleriyle bütüncül olarak karşılaştıran ilk araştırmalardan biridir. / The study is among the first to comparatively analyze three wood species from different ecological origins through an integrated approach combining classical wood anatomy and modern image analysis techniques.

Bulgular (Results): Gökmar yüksek işlenebilirlik fakat düşük dayanıklılık, Doğı Kayını güçlü mekanik performans fakat sınırlı doğal direnç, Afrika Maunu ise estetik ve boyutsal stabilite ile orta düzey dayanıklılık göstermektedir. / Fir exhibits high workability but low durability, Oriental Beech demonstrates strong mechanical performance but limited natural resistance, while African Mahogany offers aesthetics and dimensional stability with moderate durability.

Sonuç (Conclusion): Her türün kendine özgü anatomik yapısı, farklı endüstriyel uygulamalara uygunluğunu belirlemektedir. Bu yapı-performans ilişkisi, ahşap türü seçiminde bilimsel bir temel sunmaktadır. / The unique anatomical structure of each species determines its suitability for different industrial applications. This structure-performance relationship provides a scientific basis for wood species selection.



Gökmar, Doğı Kayını ve Afrika Maunu Türlerinin Makro ve Mikro Yapılarının Analizi

Çiğdem ÇİÇEK^{1*}

¹Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Ağaçışleri Endüstri Mühendisliği, Ankara, Türkiye

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 13/08/2025
Düzeltilme: 10/09/2025
Kabul: 15/09/2025

Anahtar Kelimeler

Gökmar
Doğı Kayını
Afrika Maunu
Odun Anatomisi
Mikroskopik Analiz
Damar Çapı
Trakeid
Biyolojik Dayanıklılık

Öz

Bu çalışma, farklı coğrafi kökenlere ve anatomik yapıları sahip olan Gökmar (*Abies alba*), Doğı Kayını (*Fagus orientalis*) ve Afrika Maunu (*Khaya ivorensis*) türlerine ait odun dokularının çok düzeyli yapısal özelliklerini karşılaştırmalı olarak incelemeyi amaçlamaktadır. Bu kapsamda, her tür için makroskopik (renk, damar tipi, ışın yapısı) ve mikroskopik (trakeid, damar, parankima hücreleri) karakteristikler detaylı biçimde analiz edilmiştir. Örnekler, 400x büyütme optik mikroskop ve 1000x-2000x büyütme aralıklı taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak incelenmiş; hücre çapları Python tabanlı görüntü analiz yöntemleri ile ölçülerek istatistiksel histogramlarla desteklenmiştir.

Elde edilen bulgular, Gökmar'ın yalnızca trakeid içeren homojen yapısı sayesinde yüksek işlenebilirlik sunduğunu, ancak düşük biyolojik dayanıklılığa sahip olduğunu ortaya koymuştur. Doğı Kayını'nın diffüz-porous damar yapısı, geniş ışınları ve orta lif çeper kalınlığı, onu yüksek mekanik dayanım gerektiren uygulamalar için uygun hale getirmektedir. Afrika Maunu ise geniş damar çapları, belirgin parankima şeritleri ve doğal ekstraktif içeriğiyle, özellikle estetik ve boyutsal kararlılık gerektiren uygulamalarda ön plana çıkmaktadır.

Bu karşılaştırmalı analiz, her üç türün hücresel yapı özelliklerinin, malzeme performansı ve endüstriyel kullanım alanlarıyla doğrudan ilişkili olduğunu göstermektedir. Elde edilen veriler, hem ahşap biliminde tür seçimine yönelik bilimsel karar süreçlerine katkı sağlamak hem de doğal malzeme temelli tasarımlarda yapı-performans ilişkisini bütüncül olarak değerlendirme imkânı sunmaktadır.

Analysis of the Macro and Micro Structures of Silver Fir, Oriental Beech, and African Mahogany Species

Article Info

Research article
Received: 13/08/2025
Revision: 10/09/2025
Accepted: 15/09/2025

Keywords

Silver Fir
Oriental Beech
African Mahogany
Wood Anatomy
Microscopic Analysis
Vessel Diameter
Tracheid
Biological Durability

Abstract

This study aims to comparatively examine the multi-level structural characteristics of wood tissues from three species—Silver Fir (*Abies alba*), Oriental Beech (*Fagus orientalis*), and African Mahogany (*Khaya ivorensis*)—which differ in geographic origin and anatomical structure. In this context, both macroscopic (color, vessel type, ray structure) and microscopic (tracheids, vessels, parenchyma cells) characteristics were analyzed in detail for each species. The samples were examined using an optical microscope with 400x magnification and a scanning electron microscope (SEM) with a magnification range of 1000x-2000x; cell diameters were measured using Python-based image analysis methods and supported with statistical histograms.

The findings revealed that Silver Fir offers high workability due to its homogeneous structure composed solely of tracheids but has low biological durability. The diffuse-porous vessel structure, wide rays, and high fiber wall thickness of Oriental Beech make it suitable for applications requiring high mechanical strength. African Mahogany, on the other hand, stands out in applications that demand aesthetic appeal and dimensional stability, thanks to its large vessel diameters, prominent parenchyma bands, and natural extractive content.

This comparative analysis demonstrates that the cellular structural characteristics of all three species are directly related to their material performance and industrial application areas. The data obtained contribute to scientific decision-making processes in wood species selection within wood science and offer a holistic approach to evaluating the structure-performance relationship in natural material-based designs.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Ahşap, yüzyıllardır insanlık tarihinde gerek mühendislikte gerekse mimaride temel bir yapı malzemesi olarak kullanılmakta olup, biyolojik kökenli, yenilenebilir ve doğal bir kompozit olması nedeniyle günümüzde de önemini korumaktadır. Bu çok yönlü malzemenin yaygın şekilde tercih edilmesinin ardında, eşsiz yapı ve fonksiyon özellikleri yatmaktadır. Ahşabın hem estetik hem de işlevsel olarak değerlendirilmesini sağlayan bu özellikler, özellikle farklı türler arasında belirgin varyasyonlar göstermektedir. Gökmar (*Abies alba* Mill.), doğu kayını (*Fagus orientalis* Lipsky) ve Afrika maunu (*Khaya ivorensis* A.Chev.) gibi türler, sahip oldukları farklı anatomik, fiziksel ve kimyasal nitelikler sayesinde yalnızca doğal habitatlarında değil, aynı zamanda küresel ölçekte pek çok sektörde kullanım imkânı sunmaktadır [1-3].

Bu türlerin her biri farklı endüstriyel alanlarda öne çıkmaktadır. Hafifliği ve homojen dokusuyla gökmar, inşaat ve yapısal uygulamalarda tercih edilirken; yüksek yoğunluğu ve geniş ışın yapısıyla kayın, mobilya ve zemin kaplamaları için uygundur. Afrika maunu ise zengin renk geçişleri, çapraz damar dizilimi yapısı ve biyolojik dayanıklılığı sayesinde hem lüks iç mekân tasarımlarında hem de denizcilik gibi özel alanlarda kullanılmaktadır [2-4]. Bu farklılıklar yalnızca kullanım alanlarına değil, aynı zamanda işlenebilirlik, dayanıklılık ve estetik performans gibi kriterlere de doğrudan etki etmektedir.

Ahşabın makroskobik (renk, trahe yapısı, ışınlar) ve mikroskobik (trakeid, lif, damar, parankima) düzeydeki yapısal özellikleri, türler arası karşılaştırmalar açısından büyük önem arz etmektedir. Örneğin *Fagus sylvatica* türünde yapılan araştırmalar, damar çapı ve yoğunluğunun çevresel faktörlere göre önemli ölçüde değişebildiğini göstermektedir [5, 6]. Benzer şekilde, yıllık halka yapısı ve ksilem gelişiminin de bölgesel iklim koşullarından etkilendiği bilinmektedir [7, 8].

Gökmar, trakeid ağırlıklı hücre yapısı ve düşük yoğunluğuyla hafif yapısal elemanlarda; kayın, kalın çeperli lifleri ve dağınık traheli damar organizasyonu ile yüksek mekanik performans gereken uygulamalarda; maun ise büyük trahe çapı ve apotraheal bantlı parankima yapısıyla boyutsal kararlılığı ön planda tutan alanlarda öne çıkar. [9]. Ayrıca, türlerin farklı öz ışın yapıları ve damar dizilimleri, hem kuruma davranışını hem de yüzey işlemlerini etkileyerek nihai ürünün performansına yön verir.

Yoğunluk, mekanik dayanım ve doğal dayanıklılık gibi teknik parametreler, bu türlerin hangi endüstriyel uygulamalara uygun olduğunu belirlemede kritik rol oynar. Kayın, yüksek eğilme direnci (MOR, Modulus of Rupture) ve elastikiyet modülü (MOE, Modulus of Elasticity) değerleriyle döşeme ve bükme mobilya elemanlarında ideal bir malzeme iken, maun hem görsel çekiciliği hem de ekstraktif madde içeriği sayesinde biyolojik zararlılara karşı direnç göstererek uzun ömürlü çözümler sunar [3, 4]. Buna karşılık, gökmarın düşük yoğunluğu doğal dayanıklılığını sınırlandırmaktadır. İşlenebilirlik açısından ise homojen trakeid yapısı kolaylık sağlasa da, erken (ilkbahar) ve geç (yaz) odunu arasındaki belirgin yoğunluk farkı, işleme sırasında yüzey düzgünlüğü ve yırtılma gibi sorunlara yol açabilmektedir. Türlerin bu özellikleri, kimyasal bileşimleri ve mikroskobik organizasyonlarıyla doğrudan ilişkilidir [10].

Bu bağlamda, mevcut çalışmanın temel amacı, gökmar, doğu kayını ve Afrika maunu gibi farklı ekolojik kökenlere sahip üç önemli ağaç türünün makro ve mikroskobik yapılarını çok düzeyli bir bakış açısıyla karşılaştırmak ve bu yapıların malzeme performansları üzerindeki etkilerini ortaya koymaktır. Literatürde bu üç türün karşılaştırmalı olarak değerlendirildiği çalışmalar sınırlı olup, bu araştırma hem mevcut bilgi birikimini sentezleme hem de türler arası yapı-performans ilişkisine dair özgün katkılar sunma potansiyeli taşımaktadır [3, 4, 7].

2. MATERYAL VE YÖNTEMLER (MATERIAL AND METHODS)

Bu çalışmada, Gökmar (*Abies alba* Mill.), Doğü Kayını (*Fagus orientalis* Lipsky) ve Afrika Maunu (*Khaya ivorensis* A.Chev.) türlerine ait odun örnekleri değerlendirilmiştir. Tür teşhisleri, makroskobik özellikler (renk, trahe yapısı, ışın genişliği) ve mikroskobik hücresel karakteristikler (trakeid, lif, trahe ve parankima düzeni) dikkate alınarak yapılmış, IAWA Committee (1989) kriterleri ve Schweingruber (2007) tanımlarıyla karşılaştırılarak doğrulanmıştır. Gökmar örnekleri Doğü Karadeniz Bölgesi'nden, Doğü Kayını örnekleri Bolu-Yedigöller yöresinden sağlanmıştır. Afrika Maunu örnekleri ise Türkiye'ye ithal edilen kereste partisinden, Ankara'da faaliyet gösteren bir mobilya fabrikasından temin edilmiştir. Çatlak, mantar veya böcek zararı bulunmayan, kusursuz odun parçaları seçilmiş ve laboratuvar ortamında uygun boyutlarda hazırlanarak enine kesitler alınmıştır.

Mikroskobik incelemeler için odun örnekleri, odun anatomisi çalışmalarında yaygın kullanılan standart yöntemlere (IAWA Committee, 1989; Johansen, 1940) uygun olarak hazırlanmıştır. Örnekler küçük bloklar halinde kesilmiş, %50–70 etanol serilerinde sabitlenerek dehidrasyonu sağlanmış ve mikrotom kullanılarak 15–20 µm kalınlığında enine kesitler alınmıştır. Kesitler safranin-fast green kombinasyonu ile boyanmış, gliserin-jel ile kalıcı preparatlar haline getirilmiştir. Her tür için hazırlanan kesitler Leica DM750 optik mikroskop sistemi kullanılarak 400x büyütme altında değerlendirilmiş; trakeid, trahe, lif ve ışın hücrelerinin genel dağılımı analiz edilmiştir. Daha yüksek çözünürlüklü hücresel yapıların gözlemi için ise JEOL JSM-6510LV taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile 1000x–2000x büyütme aralığında detaylı görüntüler elde edilmiştir.

Hücresel morfometrik ölçümler (trahe çapı, hücre çeper kalınlığı, porozite oranı), odun anatomisi için

önerilen standart kriterler (IAWA Committee, 1989) dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir. Her tür için enine kesitlerden rastgele seçilen en az 50 hücre üzerinde ölçümler yapılmıştır. Trahe ve trakeid çaplarının belirlenmesi için Python tabanlı OpenCV ve Scikit-Image kütüphaneleri kullanılmıştır. Hücre boşlukları cv2.findContours fonksiyonu ile tespit edilmiş, regionprops fonksiyonları ile geometrik ölçümler yapılmıştır. Ölçüm hatası ± 1.5 µm olarak belirlenmiştir. Yoğunluk ölçümü bu çalışmada doğrudan yapılmamış, ancak literatürde verilen değerler (Gökmar: ~ 0.40 – 0.45 g/cm³, Kayın: ~ 0.70 – 0.75 g/cm³, Maun: ~ 0.60 – 0.65 g/cm³) karşılaştırma amacıyla dikkate alınmıştır. Enine kesitlerden elde edilen boşluk oranları ve hücre çeper kalınlıkları ile yoğunluk arasındaki bilinen ilişki tartışma bölümünde açıklanmıştır. Çalışma kapsamındaki ağaç türlerinin temel özellikleri Tablo 1’de sunulmuştur.

Tablo 1. İncelenen ağaç türlerinin temel özellikleri (Makroskobik, mikroskobik ve teknik parametrelerin karşılaştırmalı özeti) (The basic properties of the examined tree species (Comparative summary of macroscopic, microscopic and technical parameters))

Özellik	Gökmar (Abies alba)	Doğu Kayını (Fagus orientalis)	Afrika Maunu (Khaya ivorensis)
Yayılış	Doğu Karadeniz, Kuzey Anadolu	Doğu Avrupa ve Batı Asya	Batı ve Orta Afrika
Renk	Açık krem	Kırmızımsı kahverengi	Koyu kırmızı-kahverengi
Trahe Tipi	Trahe yok, trakeid hâkim	Diffüz-porous	Yarı-halkasal
Işınlar	1–2 seriatlı, homoselüler	1–7 seriatlı, multiseriat	1–3 seriatlı, heteroselüler
Hücre Tipi	Trakeid	Lif, trahe, parankima	Geniş trahe, lif, bantlı/apotraheal & paratraheal parankima
Trahe/Trakeid Çapı (µm)	Trakeid: 7–13	Trahe: 30–44	Trahe: 180–300
Lif Çeper Kalınlığı	İnce	Kalın	Orta
Porozite (%)	Düşük	Orta	Yüksek
Yoğunluk (g/cm ³)	0.40–0.45	0.70–0.75	0.60–0.65
Doğal Dayanıklılık	Düşük (Sınıf V)	Düşük (Sınıf IV–V)	Orta (Sınıf III)
Kullanım Alanları	İnşaat, ses enstrümanları	Mobilya, parke, iç mekân dekorasyonu	Lüks mobilya, denizcilik, kaplama

3. BULGULAR VE DEĞERLENDİRME (FINDINGS AND EVALUATION)

3.1 Doğu kayını (Fagus Orientalis)

Doğu Kayını, makroskobik düzeyde homojen dokulu ve kırmızımsı-kahverengi tonlara sahip,

diffüz-porous trahe yapısına sahip bir tür olarak tanımlanır. Öz odun ve diri odun arasında belirgin bir renk farkı bulunmaz; olgun odun karakterindedir. Yıllık halka sınırları genellikle belirsizdir, ancak büyüme koşullarına bağlı olarak dar veya geniş olabilir. Öz ışınları geniş, çok sıralı

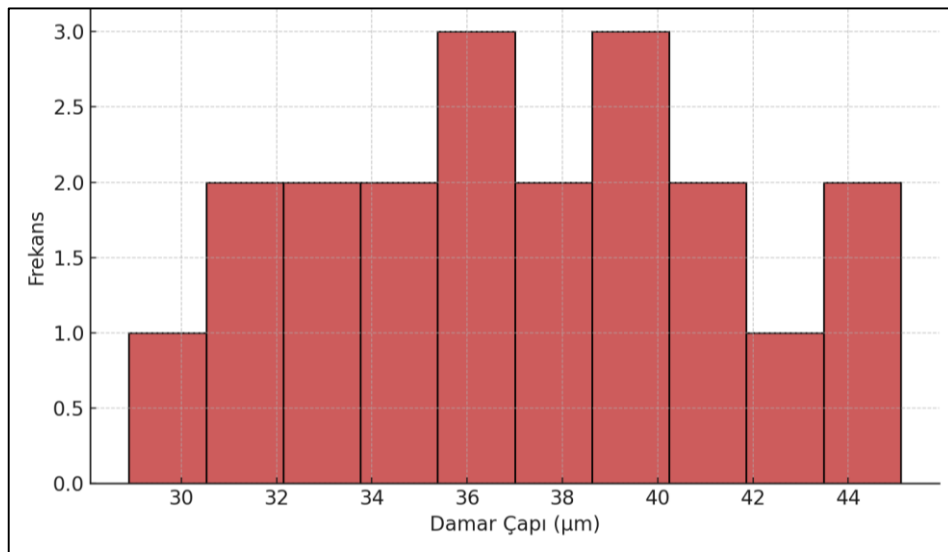
(multiseriat) yapısıyla çıplak gözle dahi ayırt edilebilir. Tekstürü ince, liflerin gidişi ise genellikle düzgün olup yüzey işlemleri için elverişlidir. Bu özellikler, kayının makroskobik tanısında önemli kriterler sunar. Makroskobik incelemeye ilişkin temsilci görüntüler Şekil 1’te verilmiştir; burada öz–diri odun ayrımı, ışın yapıları ve yıllık halka dizilimleri işaretlenmiştir.

Mikroskobik analizlerde, trahe çaplarının (lümen uzun ve kısa eksen ortalaması alınarak) 30–44 μm aralığında yoğunlaştığı saptanmıştır. Ölçümler, farklı yıllık halkalardan rastgele seçilen en az 50

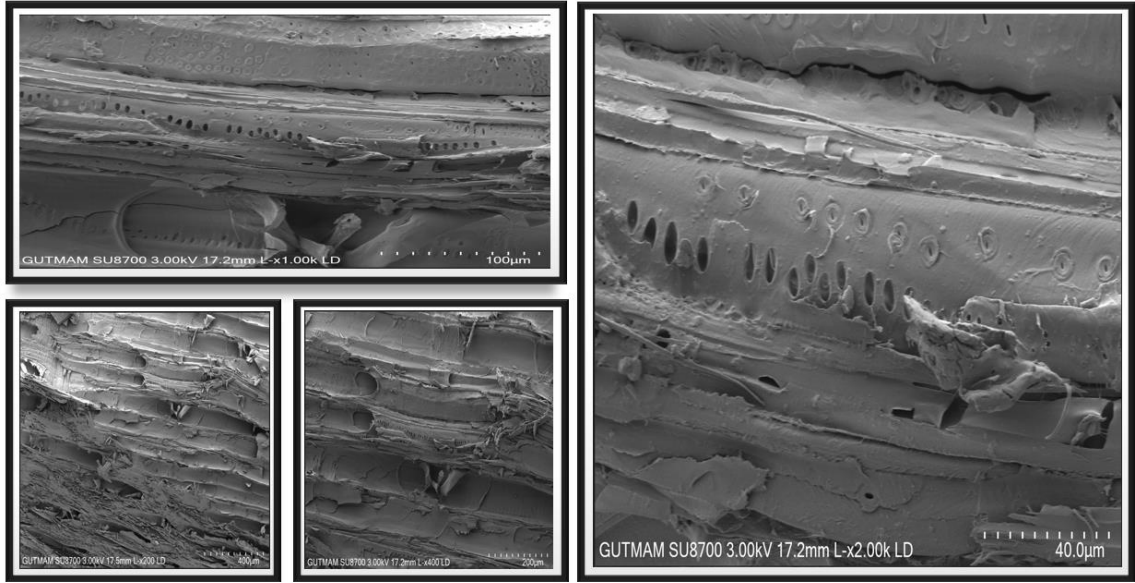
trahe üzerinde yapılmış ve değerler ortalama $\pm$ standart sapma olarak sunulmuştur (Şekil 2). Bu yöntem, IAWA Committee (1989) kriterlerine dayandırılmıştır. Python tabanlı dijital ölçüm yazılımları (OpenCV, Scikit-Image) ile yarı-denetimli analizler gerçekleştirilmiş, elde edilen histogram dağılımı 35–40 μm aralığında pik frekans göstermiştir. Ortalama trahe çapı 33.1 μm , standart sapma ise düşük seviyededir; bu durum trahe çaplarının homojen dağıldığını işaret eder. Lif hücrelerinin çeper kalınlıkları orta düzeyde olup yoğun lif dizilimi yapının mekanik direncini artırmaktadır.



Şekil 1. Doğu Kayını’na ait 400x optik mikroskop görüntüsü (teğet kesit): Diffüz-porous damar yapısı ve çok sıralı ışınların genel dağılımı görülmektedir. (Optical microscope image of Oriental Beech at 400x magnification (tangential section): The diffuse-porous vessel structure and the general distribution of multiseriate rays can be observed)



Şekil 2. Doğu Kayını’nın damar çapı histogramı: Damar çaplarının büyük bölümü 35–40 μm aralığında toplanmıştır. (Histogram of vessel diameter in Oriental Beech: The majority of vessel diameters are clustered in the 35–40 μm range.)



Şekil 3. SEM görüntüsü: Damar boşlukları net şekilde gözlenmekte, hücre çeperlerinin görece ince olduğu izlenmektedir. (SEM image: Vessel lumina are clearly observed, and the cell walls appear to be relatively thin.)



Şekil 4. Afrika Maunu'na ait optik mikroskop görüntüsü (400x, enine kesit): Damarlar düzgün konturda, yoğunluğu eş dağılımlı, parankima şeritleri belirgin. (Optical microscope image of *Khaya ivorensis* (400x, cross section): Vessels have regular contours, evenly distributed density, and distinct parenchyma bands.)

Taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri incelendiğinde, geniş lumenlere sahip damar hücrelerinin, nispeten ince çeperlerle çevrelediği dikkat çekmektedir (Şekil 3 ve Şekil 4). Bandlı parankima dokusu bu türde yaygın değildir; ışın ve liflerin homojen dağılımı yanal iletimi destekleyen bir yapı sunar. Mikroyapısal porozite ise orta

seviyededir. Geniş damar yapısı, kayının iletim kapasitesini yükseltirken, bu özellik aynı zamanda mantar ve böcek saldırılarına karşı doğal dayanıklılığın düşük olmasına neden olabilir.

Bu yapısal özellikler doğrultusunda Doğu Kayını, diffüz-porous trahe yapısı ve geniş öz ışınlarıyla öne çıkan anatomik bir türdür. Lif yoğunluğu ve çeper

kalınlıkları mekanik direnç açısından avantaj sağlarken, doğal dayanıklılığı sınırlıdır. Bu nedenle emprenye işlemleri olmaksızın dış mekân koşullarına uygun değildir. Buna karşılık iç mekân uygulamalarında, özellikle mobilya ve parke sektöründe hem görsel hem de mekanik açıdan tercih edilen bir malzeme olma potansiyeline sahiptir.

3.2 Afrika maunu (*Khaya ivorensis*)

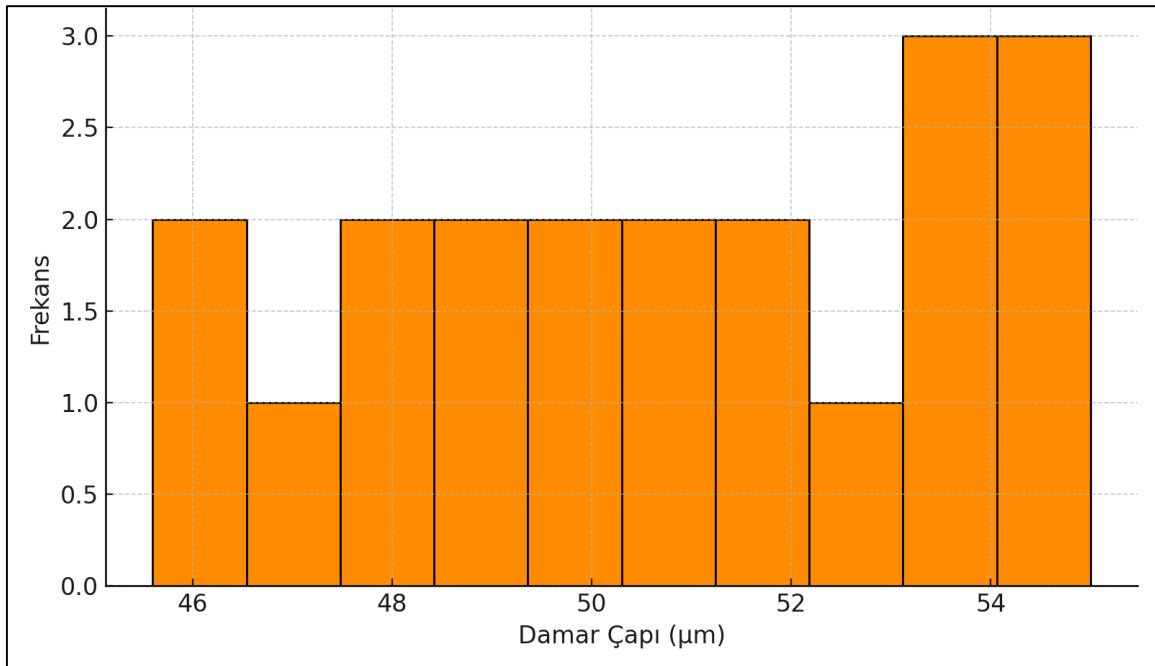
Afrika Maunu, tropik kökenli, ticari önemi yüksek bir sert ağaç türü olup hem yapısal hem de dekoratif uygulamalarda yaygın şekilde kullanılmaktadır. Makroskobik olarak koyu kırmızı-kahverengi kalp odunu ve yarı-halkasal damar dizilimi ile ayırt edilir. İnterlocked grain (çapraz damar dizilimi) yapısı, onu hem estetik hem de boyutsal olarak stabil bir malzeme haline getirir. Özellikle yüksek nemli ortamlarda bile formunu koruyabilmesi, bu türü denizcilik ve dış mekân uygulamaları için cazip kılar.

Optik mikroskop analizleri (400x büyütme) sonucunda, Afrika Maunu'na ait damar çaplarının 46–55 μm aralığında yoğunlaştığı saptanmıştır (Şekil 4). Histogram dağılımı, damar çaplarının özellikle 50–55 μm aralığında en yüksek frekansa ulaştığını göstermekte; bu durum, düzenli damar diziliminin bir göstergesi olarak değerlendirilmektedir (Şekil 5). Ölçümlere göre ortalama damar çapı 49.8 μm olup, kayın ve göknara kıyasla daha büyük çaplı damar yapısına

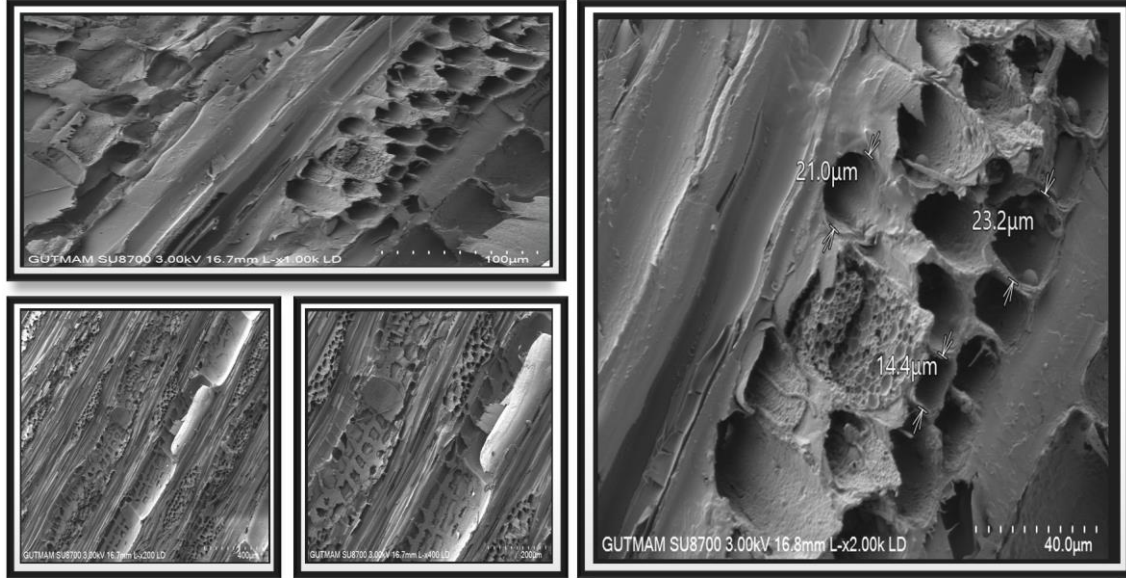
sahiptir. Damarların çevresinde parankima hücrelerinin oluşturduğu bantlar dikkat çekicidir; bu yapı, hem su iletimi hem de fiziksel dayanım açısından önemli katkılar sunmaktadır.

SEM analizlerinde (2000x büyütme) damar lumenlerinin çaplarının 14.4–23.2 μm aralığında değiştiği ve ortalama 19.9 μm olduğu ölçülmüştür (Şekil 6). Damar geometrisi oval ve düzgün konturludur. Parankima dokusunun yoğunluğu, hücre duvarlarının kalınlığından ziyade iç yapının homojenliğini sağlamaya yöneliktir. Bu yapı aynı zamanda liflerin aralarındaki mekanik kilitlenmeyi optimize eder. Gözenek yapısı ve hücrel organizasyon, Afrika Maunu'nun özgül enerji sönümleme kapasitesine olumlu katkı sağlayan bir diğer faktördür.

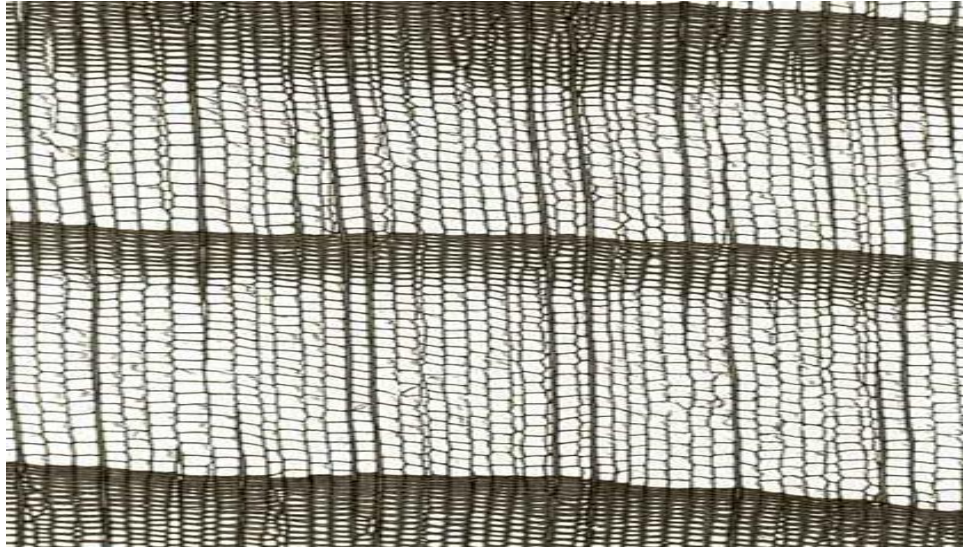
Mikro yapısal olarak, Afrika Maunu liflerinin ortalama çeper kalınlığı $2.1 \pm 0.4 \mu\text{m}$ olarak ölçülmüş olup, bu değer Doğu Kayını'nda ölçülen ortalama çeper kalınlığından ($3.4 \pm 0.5 \mu\text{m}$) daha düşüktür. Buna karşılık lif çaplarının dağılımı daha homojen olup ortalama $18.6 \pm 2.3 \mu\text{m}$ olarak hesaplanmıştır. Lifler arasındaki parankimatik alanlar düzenli bir biçimde yerleşmiş olup, bu yapı malzemenin doğal darbe dayanımını artırıcı bir faktör olarak değerlendirilebilir. Dolayısıyla Afrika Maunu, estetik özelliklerinin yanı sıra işlevsel ve biyolojik dayanıklılığıyla da öne çıkan bir türdür.



Şekil 5. Damar çapı histogramı: En yüksek frekans 50–55 μm aralığında gözlenmiştir. (essel diameter histogram: The highest frequency was observed in the 50–55 μm range.)



Şekil 6. Afrika Maunu'na ait SEM görüntüleri. Trahe hücrelerinin lümen çapları 14.4–23.2 µm arasında değişmektedir. Parankima hücreleri, trahelerin çevresinde yoğun ve düzenli bantlar halinde yerleşmiş olup homojen bir dağılım göstermektedir. (SEM images of African Maun: The lumen diameters of the tracheary elements range between 14.4–23.2 µm. The parenchyma cells are arranged in dense and regular bands around the tracheae, showing a homogeneous distribution.)



Şekil 7. Gökmar'a ait 400x optik mikroskop görüntüsü: Sadece trakeidlerden oluşan homojen hücre dizilimi izlenmektedir. (Optical microscope image of Fir at 400x magnification: A homogeneous cell arrangement consisting only of tracheids is observed.)

3.3 Gökmar (Abies Alba)

Gökmar, iğne yapraklı ağaç türleri arasında yer alan ve hücre yapısının büyük çoğunluğu trakeidlerden oluşan homojen dokulu bir odundur. Makroskobik düzeyde açık krem tonlarına sahip olup, öz–diri odun ayrımı belirgin değildir. Gökmar odununda reçine kanalı bulunmaz. Yapısal özellikleri, onu işlenebilirliği yüksek bir malzeme haline getirse de doğal dayanıklılığı sınırlıdır. Damar dokusu içermediğinden gökmarın tüm iletim ve destek

işlevleri trakeidler aracılığıyla, ayrıca öz ışınlarının yardımıyla gerçekleşir.

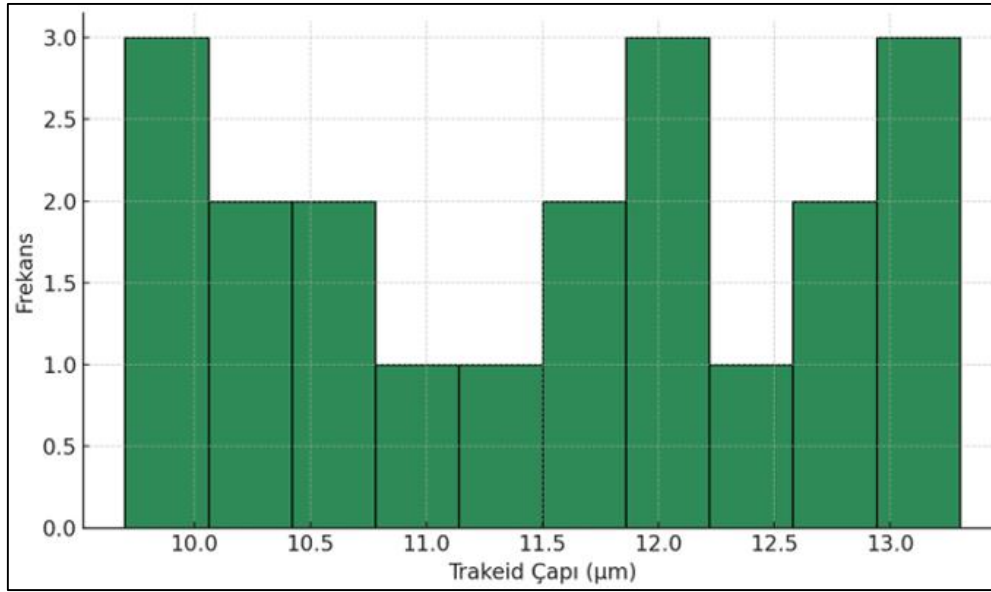
Optik mikroskop analizlerinde (400x büyütme), gökmar örneklerinde trakeid çaplarının 7–13 µm aralığında değiştiği tespit edilmiştir (Şekil 7). Histogram analizine göre, en yoğun frekansın 10–12 µm aralığında toplandığı gözlemlenmiş olup, bu dağılım türün yapısal homojenliğini

desteklemektedir (Şekil 8). Ortalama trakeid çapı $8.02 \mu\text{m}$ olarak hesaplanmıştır. Bu değer, Afrika Maunu ve Doğu Kayını ile kıyaslandığında daha küçük çaplı bir iletim sistemi olduğunu göstermektedir. Lifler (trakeidler) düz hatlı, ince çeperli ve paralel dizilimlidir. Bu durum, yapının elastikiyetini artırırken, yüksek mekanik dayanım gerektiren uygulamalarda sınırlayıcı olabilir.

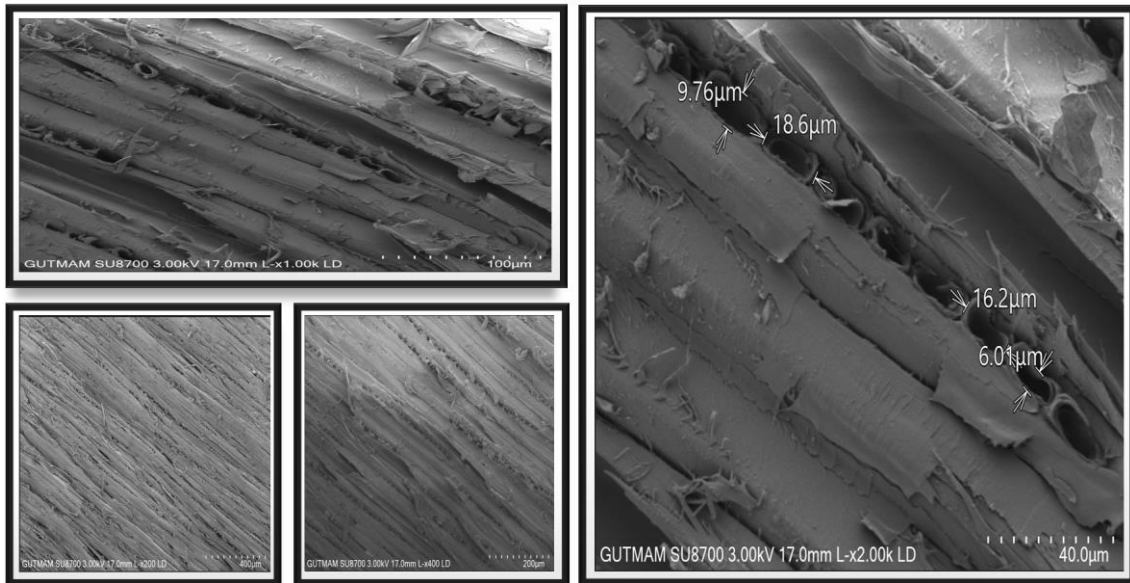
SEM analizlerinde (2000x büyütme), göknar trakeidlerinin düzgün dizildiği, lumen açıklıklarının $6.01\text{--}18.6 \mu\text{m}$ arasında değiştiği ve hücre çeperlerinin ince olduğu belirlenmiştir (Şekil 9). En dar lumen çapı $6.01 \mu\text{m}$, en geniş ise $18.6 \mu\text{m}$ olarak ölçülmüştür. Lifler arasında bandlı parankima

dokusu bulunmamakta; hücrel yapı tamamen trakeidlerden oluşmaktadır. Bu yapı, ahşap düşük ısı iletkenliğine sahiptir ($0.10\text{--}0.14 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$). ve akustik rezonans özelliği sağlaması bakımından ses panelleri ve müzik aletleri gibi özel uygulamalarda avantajlıdır.

Göknar odununun düşük yoğunluğu ve düşük ekstraktif içeriği, işlenebilirliği artırırken biyolojik dayanıklılığı sınırlamaktadır. Bu nedenle, açık ortam uygulamaları için emprenye işlemleri gerekebilir. Homojen hücre yapısı, kuruma sırasında deformasyon riskini azaltarak boyutsal stabilite açısından avantaj sağlar.



Şekil 8. Trakeid çapı histogramı: En yoğun dağılım 10–12 μm arasında, dağılım dengeli. (Tracheid diameter histogram: The highest concentration is between 10–12 μm , with a balanced distribution.)



Şekil 9. SEM görüntüsü: Trakeid lumen çapları $6.01\text{--}18.6 \mu\text{m}$ aralığında, çeper yapıları ince ve düz. (SEM image: Tracheid lumen diameters range from $6.01\text{--}18.6 \mu\text{m}$, with thin and smooth wall structures.)

4. TARTIŞMA (DISCUSSION)

Bu çalışma kapsamında Doğu Kayını, Afrika Maunu ve Gökmar türlerine ait odun dokuları çok düzeyli (makroskobik ve mikroskobik) bir perspektifle değerlendirilmiştir. Elde edilen veriler, her türün kendine özgü hücrel mimarisinin, makro ölçekteki fiziksel-mekanik özelliklerini belirleyici bir rol oynadığını göstermektedir. Bulgular, literatürde daha önce raporlanmış tür özellikleri ile uyumlu olmakla birlikte, bazı noktalarda yeni karşılaştırmalı analizler sunmaktadır [3,11].

Doğu Kayını, diffüz-porous damar dizilimi, geniş multiseriye ışın yapısı ve orta çaplı damar hücreleriyle tanımlanabilir. Damar çapı histogramı ve SEM görüntüleri, kayının yüksek iletim kapasitesine sahip ancak ince çeperli hücre yapısıyla düşük doğal dayanıklılık gösterdiğini doğrulamaktadır. Buna karşılık, mekanik dayanımı yüksek olan kayın, iç mekân uygulamaları ve bükülmüş mobilya elemanları gibi yük taşıyan sistemler için uygundur.

Afrika Maunu ise geniş damar çapları, belirgin parankima bantları ve yüksek porozite oranıyla öne çıkmaktadır. Mikroskobik düzeydeki lümen geometrisi, düzenli ve geniş olup bu durum enerji sönümlene kabiliyetini ve boyutsal kararlılığı desteklemektedir. Ayrıca, hücre içi ekstraktif maddeler sayesinde mantar ve böceklerle karşı gösterdiği orta derece dayanıklılık, maunun dış mekân ve denizcilik uygulamalarındaki kullanımını desteklemektedir. SEM ile ölçülen lümen değerleri (14.4–23.2 µm) ile optik mikroskop değerleri (46–55 µm) arasındaki fark, kullanılan büyütme düzeyi ve ölçüm alanının farklılığından kaynaklanmaktadır. SEM ölçümleri daha çok lümen iç yapısına, optik mikroskop ise genel trahe çapına odaklandığından bu farklılık normaldir. Literatürde *Khaya ivorensis* için raporlanan 100–200 µm aralığı, ölçüm eksen (tangansiyel/radyal) ve numune hazırlama farklılıklarıyla açıklanabilir.

Gökmar türü ise iğne yapraklı ağaçlar arasında tipik bir örnek olup, yalnızca trakeid hücrelerinden oluşmaktadır. Trakeid çaplarının küçük ve homojen dağılımı, SEM analizlerinde doğrulanmış; bu yapı gökmarın düşük yoğunluk ve yüksek işlenebilirlik özelliklerini açıklamaktadır. Ancak damar içermemesi ve zayıf ekstraktif içeriği nedeniyle biyolojik dayanıklılığı düşüktür. Bu durum, onu emprenye gerektiren ancak form stabilitesi önemli olan uygulamalar için uygun kılmaktadır.

Üç tür arasındaki temel farklardan biri de ışın yapılarında gözlenmiştir. Kayın çok sıralı ve geniş

ışınlarıyla yanal iletimde yüksek performans sergilerken, gökmar dar ve homoselüler ışın yapısına sahiptir. Maunun ise 1–3 seriye heteroselüler ışınları, estetik şerit etkisi oluşturmakla birlikte iletimde sınırlı katkı sağlar.

Bu çalışmada yoğunluk doğrudan ölçülmemiştir. Ancak enine kesitlerden elde edilen boşluk oranları ve hücre çeper kalınlıkları, yoğunluk ile doğrudan ilişkili parametrelerdir. Dolayısıyla türler arasındaki yoğunluk farklılıkları literatür değerleriyle birlikte değerlendirildiğinde, anatomik verilerle uyumlu bir tablo ortaya çıkmaktadır.

5. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada Gökmar (*Abies alba*), Doğu Kayını (*Fagus orientalis*) ve Afrika Maunu (*Khaya ivorensis*) türlerinin odunsu dokuları, makroskobik ve mikroskobik düzeyde karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Elde edilen bulgular aşağıda özetlenmiştir:

- Doğu Kayını, diffüz-porous trahe yapısı ve geniş multiseriye öz ışınlarıyla tanımlanmıştır. Lif çeper kalınlıklarının görece yüksek oluşu, mekanik dayanım açısından avantaj sağlamaktadır.
- Afrika Maunu, yarı-halkasal trahe dizilimi, geniş trahe çapları ve belirgin parankima bantlarıyla boyutsal kararlılık ve estetik görünüm açısından öne çıkmaktadır.
- Gökmar ise trakeid ağırlıklı yapısı sayesinde homojen hücrel organizasyona sahiptir. Bu durum kuruma sırasında boyutsal stabiliteye katkı sağlamaktadır.

Sonuç olarak, her üç türün de kendine özgü hücrel organizasyonları, farklı endüstriyel alanlara uygunluklarını belirlemektedir. Bu yapı–performans ilişkileri, ahşap türü seçiminde bilimsel bir temel sunmaktadır. Gelecek çalışmalarda, bu türlerin ısı modifikasyon ve nano-emprenye yöntemleriyle biyolojik ve mekanik özelliklerinin geliştirilmesi, ayrıca hibrit kompozit üretiminde takviye malzemesi olarak kullanım potansiyellerinin araştırılması önerilmektedir. Bunun yanında, farklı ekolojik bölgelerden alınacak örneklerle çevresel faktörlerin odun anatomisine etkilerinin incelenmesi ilerideki araştırmalara katkı sağlayacaktır.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazarı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan eder.

The author of this article declares that the materials and methods they use in their work do not require ethical committee approval and/or legal-specific permission.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Çiğdem ÇİÇEK: Tek yazarlı makale.

Single author article.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

There is no conflict of interest in this study.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Barnett JR. Reactivation of the cambium in *Aesculus hippocastanum* L.: A transmission electron microscope study. *Annals of Botany*. 1992; 70(2): 169-177.
- [2] Carvalho AM, Silva BTB, Latorraca JVF. Avaliação da usinagem e caracterização das propriedades físicas da madeira de mogno africano (*Khaya ivorensis* A. Chev.). *Cerne* 2010; 16(1): 106-114.
- [3] França TSFA, Arantes MDC, Paes JB, Vidaurre GB, Oliviera JTS, Barauna EEP. Caracterização anatômica e físico-mecânica das madeiras de duas espécies de mogno africano. *Cerne* 2015; 21(1): 20-25.
- [4] Silva JGM, Vidaurre GB, Arantes MDC, Batista DC, Soranso DR, Billo DF. Qualidade da madeira de mogno africano para a produção de serrados. *Scientia Forestalis* 2016;44: 181–190.
- [5] Sass U, Eckstein D. The variability of vessel size in beech (*Fagus sylvatica* L.) and its ecophysiological interpretation. *Trees* 1995; 9: 247–252.
- [6] Dittmar, C, Zech W, Elling W. Growth variations of common beech (*Fagus sylvatica* L.) under different climatic and environmental conditions in Europe—a dendroecological study. *Forest Ecology and Management*. 2003; 173: 63–78.
- [7] Čufar K, Prislan P, de Luis M, Gričar J. Tree-ring variation, wood formation and phenology of beech (*Fagus sylvatica*) from a representative site in Slovenia, SE Central Europe. *Trees* 2008; 22(6): 749–758.
- [8] Gruber A, Baumgartner D, Zimmermann J, Oberhuber W. Temporal dynamics of wood formation in *Pinus cembra* along the alpine treeline ecotone and the effect of climate variables. *Trees* 2009; 23: 623–635.
- [9] Schweingruber FH, Wood structure and environment. *Springer Series in Wood Science*. Springer, 2007.
- [10] Chaffey N. An introduction to the problems of working with trees. In N. Chaffey (Ed.), *Wood formation in trees: Cell and molecular biology techniques* (pp. 9–16). Taylor & Francis, 2002.
- [11] Dünisch O, Rühmann O. Kinetics of cell formation and growth stresses in the secondary xylem of *Swietenia mahagoni* Jacq. and *Khaya ivorensis* A. Chev. (Meliaceae). *Wood Science and Technology* 2006; 40: 49–62.